

Nicole Radoi

Einfluss des Mobiliars auf die Nachhaltigkeit
eines Raumes

DIPLOMARBEIT

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik

Mittweida, Leipzig, 2011

Nicole Radoi

Einfluss des Mobiliars auf die Nachhaltzeit eines
Raumes

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik

Mittweida, Leipzig, 2011

Erstprüfer: Prof. Dr. Jörn Hübelt

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Manfred Goritzka

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 10.02.2011

Bibliographische Beschreibung

Radoi, Nicole:

Einfluss des Mobiliars auf die Nachhallzeit eines Raumes. – 2011. – 87 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik,
Diplomarbeit, 2011

Referat

Ziel der Diplomarbeit ist es, Mobiliar bei raumakustischen Prognoseberechnungen zu berücksichtigen. Neben der 3D-Darstellung dieser Einrichtungsgegenstände sind Umrechnungsalgorithmen zu erarbeiten, mit welchen der Einfluss des jeweiligen 3D-Mobiliars auf eine vereinfachte 2D-Fläche in der Raumsimulationssoftware EASE übertragen werden kann.

Um diesen Einfluss besser quantifizieren zu können, werden umfangreiche Nachhallzeit- und Sprachverständlichkeitsmessungen (STI-PA - Speech Transmission Index for Public Address Systems) mit und ohne Mobiliar in einem kubisch geformten Raum durchgeführt. Diese messtechnisch ermittelten Nachhallzeitverläufe und STI-PA-Werte bilden die Grundlage zur rechnerischen Ermittlung derselben mit EASE.

Betrachtet werden mobile Einbauten, wie Schränke, Regale, Tische und Stühle. Die Umsetzung obiger Forderung soll über die Umrechnung von Absorptionsgraden erprobt werden. Des Weiteren soll der Gültigkeitsbereich der Algorithmen durch Variation verschiedener möglicher Einflussfaktoren geprüft werden. Bei diesem programminternen Problem der 3D- und 2D-Darstellung des Mobiliars wird als maximal zulässige Abweichung der Nachhallzeit $\pm 0,10$ s und der Sprachverständlichkeit in Form des STI-PA $\pm 0,05$ vorgegeben.

Danksagung

Hiermit möchte ich mich für die tatkräftige Unterstützung während meiner Diplomarbeit bei den Mitarbeitern des Ingenieurbüros goritzka *akustik* bedanken.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Manfred Goritzka für die fachliche und kritische Begleitung aber auch für die Bereitstellung der Messtechnik und Simulationssoftware.

Außerdem möchte ich mich seitens der Hochschule bei Prof. Dr. Jörn Hübelt für die stets fachlich fundierten und praxisnahen Vorlesungen bedanken, sowie für die beratende Begleitung während meiner Abschlussarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung.....	2
1.2 Herangehensweise	3
2 Theoretische Grundlagen.....	5
2.1 Das Schallfeld im Raum	5
2.2 Schallverhalten an Begrenzungsflächen	6
2.3 Raumakustische Kriterien	7
2.3.1 Übersicht	7
2.3.2 Nachhallzeit.....	8
2.3.3 Speech Transmission Index (STI/STI-PA)	10
2.4 Beeinflussung der akustischen Raumeigenschaften	12
2.4.1 Schallabsorptionsgrad und äquivalente Schallabsorptionsfläche	12
2.4.2 Poröse Schallabsorber	13
2.4.3 Plattenschwinger und Lochplattenschwinger	14
2.4.4 Weitere Resonanzerscheinungen	16
2.4.5 Schallabsorption durch Raumbegrenzungsflächen, Publikum, Gestühl und Luft	18
2.5 Reflexionswirkung von Flächen.....	19
2.5.1 Geometrisch gerichtete Reflexionen	19
2.5.2 Diffuse Reflexionen (Streuungen)	19
2.5.3 Diffusoren	20
2.6 Simulationsverfahren in der Raumakustik	21
2.6.1 Übersicht	22
2.6.2 Spiegelschallquellenverfahren	23
2.6.3 Strahlverfolgungsverfahren (Ray Tracing)	25
2.6.4 Cone Tracing	26

2.6.5	Schallteilchenverfahren.....	26
2.7	Simulationssoftware EASE.....	28
3	Untersuchungsgrundlagen	29
3.1	Messobjekt.....	29
3.1.1	Vorstellung der Untersuchungsräume A und B	29
3.1.2	Messung der Nachhallzeit und STI-PA	30
3.1.3	Einfluss verschiedener Parameter im Raum A.....	31
3.2	Festlegung der Eingangsparameter in EASE AURA.....	32
4	Simulation mit EASE AURA	35
4.1	Basismodell Raum A/Modell Raum B	35
4.1.1	Messwerte als Simulationsbasis	35
4.1.2	Kalibrierung Basismodell Raum A.....	35
4.1.3	Kalibrierung Modell Raum B	37
4.1.4	Kontrolle der Kalibrierung Raum A und B durch STI-PA	39
4.2	Prognoseberechnung Schrank	40
4.2.1	Schrank als Plattenresonator	40
4.2.2	Messung mit Schrank	42
4.2.3	Modellierung & Kalibrierung 3D-Schrank im Raum A.....	43
4.2.4	Modellierung & Kalibrierung 2D-Schrank im Raum A.....	44
4.2.5	Anwendung Umrechnungsalgorithmus im Raum B	47
4.2.6	Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei verschiedenen Schrankgrößen.....	48
4.2.7	Überprüfung mit STI-PA.....	49
4.2.8	Ergebnisse 2D-/3D-Schranksdarstellung	50
4.3	Prognoseberechnung Kombination Schrank/Regal	51
4.3.1	Regal mit Dämpfung und Streuung durch Ordner	51
4.3.2	Messung mit Kombination Schrank/Regal	51
4.3.3	Einfluss der Anordnung von Einrichtungsgegenständen	53
4.3.4	Modellierung & Kalibrierung 3D-Schrank/Regal im Raum A.....	53
4.3.5	Modellierung & Kalibrierung 2D-Schrank/Regal im Raum A.....	54
4.3.6	Anwendung Umrechnungsalgorithmus im Raum B	56
4.3.7	Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei zunehmender Wandbelegung	57
4.3.8	Überprüfung mit STI-PA.....	58
4.3.9	Ergebnisse 2D-/3D-Schrank- und Regaldarstellung.....	60
4.4	Prognoseberechnung Tisch.....	61
4.4.1	Tisch als Plattenschwinger	61
4.4.2	Messungen mit Tischen	61
4.4.3	Modellierung & Kalibrierung 3D-Tische im Raum A	63

4.4.4	Modellierung & Kalibrierung 2D-Tische im Raum A	63
4.4.4.1	Prinzip der 2D-Tischdarstellung	63
4.4.4.2	These	63
4.4.4.3	Thesenkontrolle	65
4.4.5	Anwendung Umrechnungsalgorithmus im Raum B	70
4.4.6	Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei Variation möglicher Einflussfaktoren	71
4.4.6.1	Tischanzahl	71
4.4.6.2	Tischgröße, -höhe und -position	71
4.4.6.3	Lautsprecherhöhe	72
4.4.6.4	Andere Tisch- und Bodenabsorption	72
4.4.6.5	Andere Raumform und -größe	73
4.4.7	Überprüfung mit STI-PA	74
4.4.8	Ergebnisse 2D-/3D-Tischdarstellung	75
4.5	Prognoseberechnung Stuhl	76
4.5.1	Stuhl als poröser Absorber	76
4.5.2	Messungen mit Stühlen	76
4.5.3	Modellierung & Kalibrierung 3D-Stühle im Raum A	77
4.5.4	Modellierung & Kalibrierung 2D-Stühle im Raum A	78
4.5.4.1	Prinzip der 2D-Stuhldarstellung	78
4.5.4.2	These	78
4.5.5	Anwendung Umrechnungsalgorithmus im Raum B	82
4.5.6	Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei Variation möglicher Einflussfaktoren	82
4.5.6.1	Stuhlanzahl	82
4.5.6.2	Stuhlhöhe	83
4.5.7	Überprüfung mit STI-PA	83
4.5.8	Ergebnisse 2D-/3D-Stuhldarstellung	84
5	Zusammenfassung	85
6	Ausblick	87
	Anlagen	XI
	Literaturverzeichnis	XLV
	Selbständigkeitserklärung	XLVIII

Abkürzungsverzeichnis

AURA	Analysis Utility for Room Acoustics
BEM	Boundary-Elemente-Methode
CAD	Computer Aided Design
CAESAR	Computer Aided Evaluation, Simulation and Auralisation of Room acoustics
E	Empfänger
EASE	Enhanced Acoustic Simulator for Engineers
FEM	Finite-Elemente-Methode
HP	Hörerposition
LSP	Lautsprecher
MTF	Modulationsübertragungsfunktion
RASTI	Rapid Speech Transmission Index
S	Sender
SSQ	Spiegelschallquelle
STI	Speech Transmission Index
STI-PA	Speech Transmission Index for Public Address Systems

Symbolverzeichnis

a	[m]	Dicke des Lufthohlraumes
α	[]	Schallabsorptionsgrad
α_i	[]	Schallabsorptionsgrad einer Teilfläche
α_{Raum}	[]	räumlicher Mittelwert des Schallabsorptionsgrades
α_x	[]	Schallabsorptionsgrad, x als Synonym für Mobiliar/ Material
A	[m ²]	äquivalente Schallabsorptionsfläche
A_j	[m ²]	äquivalente Schallabsorptionsfläche Gegenstand, Person
A_x	[m ²]	äquivalente Schallabsorptionsfläche, x als Synonym für Mobiliar/Material
AL_{con}	[%]	Artikulationsverlust für Konsonanten
b	[m]	Strukturbreite
B'	[Nm]	Biegesteifigkeit der Platte bezogen auf ihre Breite
BR	[]	Bassverhältnis
c_0	[m/s]	Schallgeschwindigkeit in Luft, $c_0 \approx 340$ m/s
c_L	[m/s]	Longitudinalwellengeschwindigkeit
C_{50}	[dB]	Deutlichkeitsmaß
C_{80}	[dB]	Klarheitsmaß
δ	[]	Streugrad
D_{50}	[%]	Deutlichkeitsgrad
d	[m]	Plattendicke
d_L	[cm]	Wandabstand
d_{max}	[m]	größte Strukturtiefe
d_{Struktur}	[m]	Strukturtiefe
ρ	[kg/m ³]	Dichte
e	[mm]	Plattenabstand
E	[Pa]	Elastizitätsmodul
EDT	[s]	Anfangsnachhallzeit
EK	[]	Echokriterium
f_{mod}	[Hz]	Modulationsfrequenz
f_0	[Hz]	Resonanzfrequenz
f_c	[Hz]	Schroedersche Grenzfrequenz
f_{H0}	[Hz]	Hohlraumresonanzfrequenz
f_{n_x, n_y}	[Hz]	Biegeeigenfrequenz
f_{opt}	[Hz]	optimale Frequenz
f_u	[Hz]	niedrigste Frequenz
G	[dB]	Stärkemaß

H	[dB]	Hallmaß
He	[]	Helmholtz-Zahl
I	[ms]	Intimität
I_x	[W/m ²]	Schallintensität in Abhängigkeit des Indexes x
I_0	[W/m ²]	einfallende Schallintensität
I_a	[W/m ²]	absorbierte Intensität
I_t	[W/m ²]	transmittierte Intensität
I_e	[W/m ²]	einfallende Intensität
I_r	[W/m ²]	reflektierte Intensität
I_{diss}	[W/m ²]	dissipierte Intensität
λ	[m]	Wellenlänge
λ_0	[m]	Resonanzwellenlänge
L	[m]	charakteristische Hindernisabmessung
ΔL	[dB(A)]	Schalldruckpegelminderung
LF	[%]	Seitenschallgrad
10lgLF	[dB]	Seitenschallmaß
l_v, l_w	[m]	Abmessungen der Platte
\bar{l}	[m]	mittlere freie Weglänge zw. Raumbegrenzungsflächen
m	[1/m]	Energiedämpfungskonstante in Luft
m', m'_1, m'_2	[kg/m ²]	flächenbezogene Masse der Platte
m'_L	[kg/m ²]	wirksame Lochmasse
$m(F)$	[]	Modulationsübertragungsfunktion
$m_{\text{Stuhlunterseite,3D}}$	[]	Faktor für Abschattung Stuhlunterseite
$m_{\text{Tischunterseite,3D}}$	[]	Faktor für Abschattung Tischunterseite
μ	[]	Querkontraktionszahl
n_j	[]	Zahl der Gegenstände und Personen
n_{Boden}	[]	Faktor für Abschattung Boden
n_v, n_w	[]	Ordnungen der Eigenfrequenzen
p	[Pa]	Schalldruck
\tilde{p}_e	[Pa]	Effektivwert des einfallenden Schalldrucks
P_s	[W]	gestreute Schallleistung
R	[dB]	Raumeindrucksmaß
r_H	[m]	Hallradius
r_r	[%]	Reflexionsfaktor
r_s	[Pa*s/m ²]	längenbezogener Strömungswiderstand (früher: Ξ)
R_s	[kPa*s/m]	spezifischer Strömungswiderstand
σ	[]	Standardabweichung
σ_M	[]	Porosität des Materials
s_{Str}	[]	Strukturfaktor

s'	[N/m ³ , MN/m ³]	dynamische Steifigkeit (Luft: $s' = 1,4 \cdot 10^5 \cdot 1/a$ N/m ²)
S_i	[m ²]	Teilfläche
S, S_{ges}	[m ²]	Gesamtoberfläche aller Raumbegrenzungen
S_q	[m ²]	Streuquerschnitt
S_{Res}	[cm ²]	Fläche Resonatorhalsquerschnitt
S_x	[m ²]	Fläche, x als Synonym für Mobiliar in 2D-/3D-Darstellung
S/N	[dB]	Signal-Stör-Verhältnis
T	[s]	Nachhallzeit
\bar{T}	[s]	mittlere Nachhallzeit
\hat{T}	[s]	Schätzwert der erwarteten mittleren Nachhallzeit
T_{20}	[s]	Nachhallzeit ermittelt aus einem Pegelabfall um 20 dB
T_{30}	[s]	Nachhallzeit ermittelt aus einem Pegelabfall um 30 dB
T_{60}	[s]	Nachhallzeit ermittelt aus einem Pegelabfall um 60 dB
ΔT	[s]	Differenz der Nachhallzeit
t	[s]	Zeit
t_{Res}	[cm]	Resonatorhalslänge (Materialdicke)
T_s	[ms]	Schwerpunktzeit
T_{soll}	[dB]	angestrebte Nachhallzeit
θ	[]	Ausfallswinkel
V	[m ³]	Raumvolumen
V_L	[m ³]	Porenvolumen
V_{Res}	[dm ³]	Resonatorvolumen
$x_{\text{Stuhl,3D}}$	[]	Faktor für Abschattung Stuhl
y_{Boden}	[]	Faktor für Abschattung Boden

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schallintensitäten an trennenden Bauteilen, in Anlehnung an /9/	6
Abbildung 2: Beispiel einer Raumimpulsantwort /3/	8
Abbildung 3: Nachhallvorgang für Schalldruck p und Schalldruckpegel L_p /3/	9
Abbildung 4: anzustrebender Bereich der Nachhallzeit für Sprache /3/	10
Abbildung 5: Modell poröser Stoff mit gleicher Porosität bzw. Porenvolumen V_L /3/ ...	14
Abbildung 6: erhöhte Wirksamkeit des Absorbers im Schnellextraktum /3/	14
Abbildung 7: Resonanzfrequenz von Plattenschwingern /3/	15
Abbildung 8: Prinzipdarstellung eines Helmholtzresonators /3/	16
Abbildung 9: raumakustische Prognoseverfahren, in Anlehnung an /22/	22
Abbildung 10: geometrisch gerichtete Reflexionen /3/	24
Abbildung 11: Prinzip des Spiegelschallquellenverfahrens /3/	24
Abbildung 12: Raum A (Foto links, Grundriss rechts)	29
Abbildung 13: Deckensegel	30
Abbildung 14: berechnete Raummoden im Raum A (ohne und mit Schrank)	31
Abbildung 15: mit EASE erstelltes Raumgittermodell Raum A	36
Abbildung 16: Gegenüberstellung Messung und kalibrierte Berechnung, Raum A	37
Abbildung 17: Gegenüberstellung Messung und kalibrierte Berechnung, Raum B	38
Abbildung 18: Schrank	40
Abbildung 19: gemessene Nachhallzeiten mit Schrank im Raum A und B	42
Abbildung 20: Einfluss der äquivalenten Schallabsorptionsfläche auf die Nachhallzeit	43
Abbildung 21: Prinzip der 3D-/2D-Modellierung Schrank	44
Abbildung 22: Berechnungen mit 3D- und 2D-Schrank, Raum A	46
Abbildung 23: Messung und Simulation mit 3D- und 2D-Schrank, Raum B	48
Abbildung 24: Kombination Schrank/Regal	51
Abbildung 25: Messungen bei einseitiger Belegung mit Schränken/Regalen, Raum A	52
Abbildung 26: Prinzip der 3D-/2D-Modellierung Schrank/Regal	54
Abbildung 27: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Schrank/Regal, Raum A ...	56
Abbildung 28: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Schrank/Regal, Raum B ...	57
Abbildung 29: Berechnungen mit steigender Wandbelegung Schrank/Regal, Raum A	58
Abbildung 30: Tisch	61
Abbildung 31: Messungen mit Tischen, Raum A	62
Abbildung 32: Prinzip der 3D-/2D-Modellierung Tisch	63
Abbildung 33: kleinste Fehlerquadrate nach Gauß für 2D-Darstellung Tisch	67
Abbildung 34: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Tischen, Raum A	68
Abbildung 35: EASE Strahlverfolgung im Raum A mit 10 Tischen (Seitenansicht)	69
Abbildung 36: Bodenabschattung durch Tische (Draufsicht)	70
Abbildung 37: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Tischen, Raum B	70

Abbildung 38: gepolsterter, unbesetzter Stuhl	76
Abbildung 39: Messungen mit Stühlen, Raum A.....	77
Abbildung 40: Prinzip der 2D-/3D-Modellierung Stuhl.....	78
Abbildung 41: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Stühlen, Raum A	81
Abbildung 42: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Stühlen, Raum B	82
Abbildung 43-A: 20 % Streuung aller Oberflächen ohne Streukoeffizienten (EASE) ..	XIII
Abbildung 44-A: frequenzabhängiger Streukoeffizient (EASE)	XIV
Abbildung 45-A: Auswahl der Materialfläche (EASE).....	XIV
Abbildung 46-B: Sender (S)- und Empfängerpositionen (E).....	XVI
Abbildung 47-F: Berechnungen bei variabler Schrankgröße, Raum A.....	XXVIII
Abbildung 48-G: Messungen bei einseitiger Anordnung Schränke/Regale, Raum B.....	XXIX
Abbildung 49-G: Messungen bei verteilter Anordnung Schränke/Regale, Raum A.	XXIX
Abbildung 50-G: Messungen bei verteilter Anordnung Schränke/Regale, Raum B..	XXX
Abbildung 51-H: Messungen mit Tischen, Raum B.....	XXXII
Abbildung 52-H: Berechnungen bei verschiedener Tischanzahl, Raum A	XXXII
Abbildung 53-H: Berechnungen bei variablen Tischmaßen, Raum A	XXXIII
Abbildung 54-H: Berechnungen bei variablen Tischhöhen, Raum A.....	XXXIII
Abbildung 55-H: Berechnungen bei Variation der Tischposition, Raum A.....	XXXIV
Abbildung 56-H: Berechnungen bei Variation der Lautsprecherhöhe, Raum A.....	XXXIV
Abbildung 57-H: Berechnungen bei variiert Tischabsorption, Raum A.....	XXXVI
Abbildung 58-H: Berechnungen mit Tischen bei variiert Bodenabsorption, Raum A.....	XXXVII
Abbildung 59-H: Berechnungen mit Tischen bei anderer Raumform/ -größe, Raum A.....	XXXVII
Abbildung 60-I: Messungen mit Stühlen, Raum B	XXXVIII
Abbildung 61-I: Berechnungen bei variabler Stuhlanzahl, Raum A.....	XXXVIII
Abbildung 62-I: Berechnungen bei variabler Stuhlhöhe, Raum A	XXXIX
Abbildung 63-J: Ablaufschema bei Prognoseerstellung	XL
Abbildung 64-J: Modell ohne Mobiliar	XLI
Abbildung 65-J: berechnete Nachhallzeit im Raum ohne Mobiliar	XLI
Abbildung 66-J: Modell ohne Mobiliar, mit Deckenabsorber	XLI
Abbildung 67-J: berechnete Nachhallzeit im Raum ohne Mobiliar, mit Deckenabsorber	XLI
Abbildung 68-J: Modell mit 3D-Mobiliar	XLII
Abbildung 69-J: Modell mit 2D-Mobiliar	XLII
Abbildung 70-J: berechnete Nachhallzeit im Raum mit 3D- bzw. 2D-Mobiliar.....	XLIII
Abbildung 71-J: Modell mit 2D-Mobiliar und Deckenabsorber	XLIV
Abbildung 72-J: Vergleich berechneter Nachhallzeiten im Raum mit Mobiliar	XLIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Raumakustische Kriterien und ihre Optimalwerte /3/, /9/	7
Tabelle 2: STI und Sprachverständlichkeit /17/	12
Tabelle 3: Mindestabmaße ($\lambda/2$) für die streuende Wirkung von Strukturen /3/	20
Tabelle 4: Variation der Laufzeit, 20 % Streuung, 78.000 Partikel, HP 1	33
Tabelle 5: kalibrierte Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen mit AURA	36
Tabelle 6: Absorptionsgrade Deckensegel und Leuchten	38
Tabelle 7: Gegenüberstellung Messung und Simulation STI-PA	39
Tabelle 8: Absorptionsgrade 3D-Schrank	44
Tabelle 9: berechnete Absorptionsgrade Schrank α_{Schrank}	45
Tabelle 10: Gegenüberstellung Messung und Simulation bei 2D- und 3D-Schrank	49
Tabelle 11: Absorptionsgrade Schrank, Regal	53
Tabelle 12: berechnete Absorptionsgrade Kombination Schrank/Regal $\alpha_{\text{Schrank/Regal, 2D}}$	55
Tabelle 13: Vergleich Messung und Simulation STI-PA bei Kombination Schrank/Regal	59
Tabelle 14: Vergleich Messung und Berechnung bei Verdopplung der Tischanzahl ...	62
Tabelle 15: Absorptionsgrade Tisch	63
Tabelle 16: kleinste Fehlerquadrate nach Gauß für 2D-Darstellung Tisch	66
Tabelle 17: berechnete Absorptionsgrade Tisch $\alpha_{\text{Tisch, 2D}}$	68
Tabelle 18: Vergleich Messung und Simulation STI-PA bei Tischen	74
Tabelle 19: Absorptionsgrade Stuhl	78
Tabelle 20: berechnete Absorptionsgrade Stuhl $\alpha_{\text{Stuhl, 2D}}$	80
Tabelle 21: Vergleich Messung und Simulation STI-PA bei Stühlen	83
Tabelle 22-B: Grundgeräuschpegel Raum A	XVIII
Tabelle 23-C: Absorptionsgrade von Raumbegrenzungsmaterialien (Literatur)	XIX
Tabelle 24-C: Übersicht Absorptionsgrade	XX
Tabelle 25-D: wiederholte Berechnung der Nachhallzeit am HP 1	XXI
Tabelle 26-D: Mittelung der Nachhallzeit des Raumes über drei Empfänger	XXI
Tabelle 27-D: wiederholte Berechnung der STI-PA-Werte	XXII
Tabelle 28-E: Messwerte der Nachhallzeiten im Raum A	XXIII
Tabelle 29-E: Messwerte der Nachhallzeiten im Raum B	XXIV
Tabelle 30-E: gemessene STI-PA-Werte im Raum A	XXV
Tabelle 31-E: gemessene STI-PA-Werte im Raum B	XXVI
Tabelle 32-F: berechnete 2D-Absorptionsgrade in Abhängigkeit der Schrankgröße	XXVII
Tabelle 33-G: 2D-Absorptionsgrade Schrank/Regal (variable Wandbelegung)	XXXI
Tabelle 34-H: berechnete 2D-Absorptionsgrade Tisch (andere 3D-Tischwerte)	XXXV
Tabelle 35-H: 2D-Absorptionsgrade Tisch (andere Bodenwerte)	XXXVI
Tabelle 36-J: Absorptionsgrade Deckenabsorber im Raum ohne Mobiliar	XLI
Tabelle 37-J: Absorptionsgrade α_{3D} des 3D-Mobiliars (bekannt)	XLII
Tabelle 38-J: Absorptionsgrade α_{2D} des 2D-Mobiliars (berechnet)	XLIII
Tabelle 39-J: Absorptionsgrade Deckenabsorber im Raum mit Mobiliar	XLIV

1 Einleitung

Die akustische Eignung eines Raumes - hier für Sprache - in Bezug auf optimale Hörbedingungen für bestimmte Nutzungen, wie z.B. Büroräume, Unterrichtsräume oder Konferenzräume wird von vielen Faktoren beeinflusst.

Die räumliche Akustik (z.B. Nachhallzeit und Sprachverständlichkeit) ist neben der Primärstruktur – bedingt durch Raumform und Raumvolumen - auch von der Sekundärstruktur – in Form der Oberflächenbeschaffenheit der Raumbegrenzungsflächen und der Einrichtungsgegenstände – abhängig. Mit steigender Anzahl der Einrichtungsgegenstände bestimmen zunehmend die sekundären Strukturmerkmale die räumliche Akustik. Der Schall wird dann nicht nur überwiegend reflektiert und absorbiert, sondern auch gestreut, gebündelt und gebeugt.

Um die raumakustischen Eigenschaften eines Raumes hinreichend genau prognostizieren zu können, ist es zweckmäßig, entsprechende Simulationsprogramme zu verwenden. Während die akustische Wirkung der Raumbegrenzungsflächen mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden kann (allgemein anerkannte Regeln der Technik sind u.a. statistische Verfahren nach *Sabine* oder *Ray Tracing*), fehlen z.Z. ausreichend gesicherte Informationen zum Einfluss und der Modellbildung des Mobiliars. So können in einigen Fällen die angestrebten raumakustischen Größen – wie z.B. die Nachhallzeit - allein durch geeignetes Mobiliar erreicht und somit auf kostenintensive raumakustische Maßnahmen verzichtet werden.

Bei der Messung der Nachhallzeit in einem bestehenden Raum werden alle die die Schallausbreitung im Raum – nachfolgend aufgeführt - beeinflussenden Parameter (Näheres in **Abschnitt 3.1.3**) erfasst.

- A) Raumabmaße → Wirken der Raummoden im tiefen Frequenzbereich
- B) Schallabsorption der Raumbooberflächen und der Objekte
- C) Schallstreuung durch die Oberflächenstrukturierung (z.B. Fenster, Heizkörper, Mobiliar)

Der Einfluss dieser variablen Parameter auf die **gemessene Nachhallzeit** ist kumulativ. Es ist somit in erster Instanz nicht möglich, den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Nachhallzeit quantitativ zu ermitteln.

Basierend auf dieser „Realität“ ergeben sich Probleme bei der rein rechnerischen Ermittlung der Nachhallzeit. Durch iteratives Vorgehen – unter Berücksichtigung physikalischer Gesetzmäßigkeiten - bei der Erstellung des raumakustischen Berechnungsmodells kann man das Rechenmodell so kalibrieren, dass Messung und Rechnung weitestgehend übereinstimmen.

Liegen dagegen keine Messwerte vor, wie dies bei der Planung raumakustischer Maßnahmen gegeben ist, dann können sich – insbesondere bei der Modellierung von Objekten in nicht bzw. gering raumakustisch gestalteten Räumen - Probleme ergeben.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, zum einen durch raumakustische Messungen Informationen zum Absorptionsverhalten von sekundären Strukturen zu ermitteln und zum anderen soll deren Einarbeitung in EASE¹ vereinfacht werden. Dabei sind folgende Fragen zu klären:

- (1) Welchen raumakustischen Einfluss weisen Einrichtungsgegenstände, wie Schränke, Regale, Tische und Stühle auf?
- (2) Wie genau werden diese Erkenntnisse mit dem EASE-Modul AURA simuliert und wie sind die Eingangsparameter (Partikelanzahl, Laufzeit, Streuung, Anzahl simultaner Rechenalgorithmen) in AURA zu wählen?
- (3) Ist es möglich, durch Vergabe von frequenzabhängigen Absorptionsgraden in EASE diese sekundären Strukturen als 2D-Fläche so nachzubilden, dass die Ergebnisse denen der 3D-Modellierung entsprechen? Dabei soll die Toleranz der Nachhallzeit $\pm 0,10$ s entsprechen und die der Sprachverständlichkeit in Form des STI-PA $\pm 0,05$.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen durch die Beantwortung der Fragen (1) – (3) sind Umrechnungsalgorithmen zu entwickeln, mit denen der Einfluss der betrachteten sekundären Strukturen in 2D-Darstellung mathematisch beschrieben werden kann.

¹ Programm zur modellhaften Berechnung von raumakustischen Größen

1.2 Herangehensweise

Die grundlegende raumakustische Planung basiert im Allg. auf der rechnerischen Ermittlung der Nachhallzeit und bei höherer Qualität der Sprachverständlichkeit (STI/STI-PA). Um beide Größen mit ausreichender Genauigkeit zu berechnen, ist u.a. eine entsprechende Kenntnis des schalltechnischen Einflusses des Mobiliars erforderlich. Da hierzu z.Z. noch keine ausreichend gesicherten Informationen vorliegen, wird in dieser Untersuchung schwerpunktmäßig der Einfluss des Mobiliars behandelt.

Um mit der Raumsimulationssoftware EASE realistische Nachhallzeitverläufe sowohl im **Basismodell** (leerer Raum, ohne raumakustische Maßnahme) als auch in Modellen mit spezifischem Mobiliar iterativ kalibrieren zu können, bilden die Ergebnisse von Nachhallzeitmessungen die entscheidende Basis.

Weil in der raumakustischen Planungspraxis oftmals die akustischen Bedingungen von Büroräumen, Gaststätten, Lesesälen usw. prognostiziert werden, wird ein als Bürozimmer genutzter Raum untersucht. Dieser wird nach DIN 18041 in die Kategorie *Räume der Gruppe B* (Hörsamkeit über geringe Entfernungen) eingeordnet. In Büroräumen ist es üblich, zur raumakustischen Gestaltung Deckenabsorber anzubringen. Bei den Messungen wird aus diesem Grund in

- **Raum A** (ohne absorbierende Deckensegel) und
- **Raum B** (mit absorbierenden Deckensegeln)

unterschieden, wobei der unmöblierte **Raum A** als Basismodell in EASE dient.

Wie schon ausgeführt, wird die Nachhallzeit vorrangig vom Raumvolumen und dem Schallabsorptionsvermögen der Raumflächen, inklusive Mobiliar bestimmt. Dabei spielt die geometrische Anordnung im Allg. eine untergeordnete Rolle. Bei der Ermittlung der Sprachverständlichkeit kann die Anordnung aber einen wesentlichen Einfluss haben. Um beide raumakustischen Größen im Rahmen dieser Diplomarbeit mit hinreichender Genauigkeit zu prognostizieren, werden Nachhallzeit und Sprachverständlichkeit - in Form des STI-PA - der Modellkalibrierung zugrunde gelegt.

Durch diese Herangehensweise kann kontrolliert werden, inwieweit der STI-PA in EASE - bei Integration von 3D- und 2D-Mobiliar - nachgebildet werden kann und die ermittelten Umrechnungsalgorithmen anwendbar sind.

Die Abarbeitung der Zielstellung erfolgt schrittweise:

- 1) umfangreiche raumakustische Nachhallzeitmessungen im **Raum A** und **B** mit und ohne Mobiliar
- 2) umfangreiche raumakustische STI-PA-Messungen im **Raum A** und **B** mit und ohne Mobiliar
- 3) Festlegung der Eingangsparameter im EASE-Modul AURA und Genauigkeitsbetrachtung (**Abschnitt 3.2**)
- 4) Erstellung und Kalibrierung Basismodell **Raum A** (**Abschnitt 4.1.2**)
- 5) Erstellung und Kalibrierung Modell **Raum B** durch Integration der Deckensegel (**Abschnitt 4.1.3**)
- 6) Prognoseberechnungen für Schrank, Kombination Schrank/Regal, Tisch und Stuhl (**Abschnitt 4.2 f.**)
 - raumakustischer Einfluss des jeweiligen Mobiliars
 - Modellierung und Kalibrierung 3D-Mobiliar im **Raum A**
 - Modellierung und Kalibrierung 2D-Mobiliar im **Raum A**
 - These
 - Anwendung Umrechnungsalgorithmus im **Raum B**
 - Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei Variation möglicher Einflussfaktoren
 - Überprüfung mit STI-PA

Im dem nachfolgenden **Abschnitt 2** werden die für die Bearbeitung der Aufgabenstellung benötigten Grundlagen ausgewiesen.

2 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Abhandlungen beziehen sich ausschließlich auf die Raumakustik und zur thematischen Abgrenzung der Diplomarbeit auf die raumakustische Auslegung von Räumen für Sprache. Die hier betrachteten akustischen Anforderungen an Räume für Sprache basieren auf der DIN 18041 (Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen) /15/.

2.1 Das Schallfeld im Raum

Das Schallfeld im Raum setzt sich zusammen aus einem **direkten Schallfeld** (Quellennähe: Verhältnisse, wie im Freifeld) und einem **diffusen Schallfeld** (ideal: homogene Schallintensität, isotroper Schalleinfall).

Das Direktfeld bildet sich in der Nähe von Schallquellen aus, soweit reflektierter und gebeugter Schall vernachlässigt werden kann. Der ortsabhängige Schalldruck des Direktfeldes, welcher größer ist als im Diffusfeld, sinkt mit zunehmender Entfernung zur Quelle ($p \sim 1/r$). Eine Entfernungsverdopplung von einer Punktschallquelle bewirkt eine Pegelabnahme um 6 dB.

Als **Hallradius** r_H bezeichnet man die Entfernung von der Schallquelle, bei der der Anteil des Direktschalls genauso groß ist, wie der Anteil des Diffusschalls und der Summenpegel um 3 dB höher ist als die einzelnen Anteile.

Ein diffuses Schallfeld entsteht, wenn die eingespeisten Schallsignale genügend Eigenmoden des Raumes anregen. Es setzt sich zusammen aus:

- direkten Schallwellen
- reflektierten Schallwellen
- vielfachreflektierten und gestreuten Schallwellen

Durch Überlagerung des direkten und diffusen Schallfeldes entsteht ein **Gesamtschallfeld**.

Um das Raumverhalten aus akustischer Sicht abschätzen zu können, sollte der Raum immer im Zusammenhang mit den Wellenlängen betrachtet werden. Oberhalb der **Schroederschen Grenzfrequenz** f_c ist eine ausreichende Modendichte für die Bildung eines diffusen Schallfeldes gegeben. Unter dieser Grenzfrequenz treten störende Raumresonanzen (Diese stehenden Wellen führen zu örtlich schwankenden Schallintensitäten.) mit hervortretenden Max- und Minima auf und behindern die

Ausbildung eines diffusen Schallfeldes. Somit verlieren z.B. Messung und Berechnung der **Nachhallzeit** T in diesem Bereich an Aussagekraft.

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2-1)$$

Diese Frequenz ist abhängig vom **Raumvolumen** V und von den Reflexions- und Absorptionseigenschaften der Raumboflächen. /9/, /3/, /11/, /21/

2.2 Schallverhalten an Begrenzungsflächen

Wenn eine Quelle Schall emittiert, wird dieser bei seiner Ausbreitung im Raum wiederholt an Hindernissen reflektiert und in Abhängigkeit der Materialeigenschaften absorbiert. Die Energie der Schallwelle wird entsprechend der Oberflächenabsorption schrittweise verringert. Entsprechend **Abbildung 1** wird der auf die Flächen auftreffende Schall entweder durch Reibungsvorgänge in Wärme (Dissipation) bzw. resonanzabhängig in Bewegungsenergie umgewandelt oder in einen benachbarten Raum übertragen (Transmission).

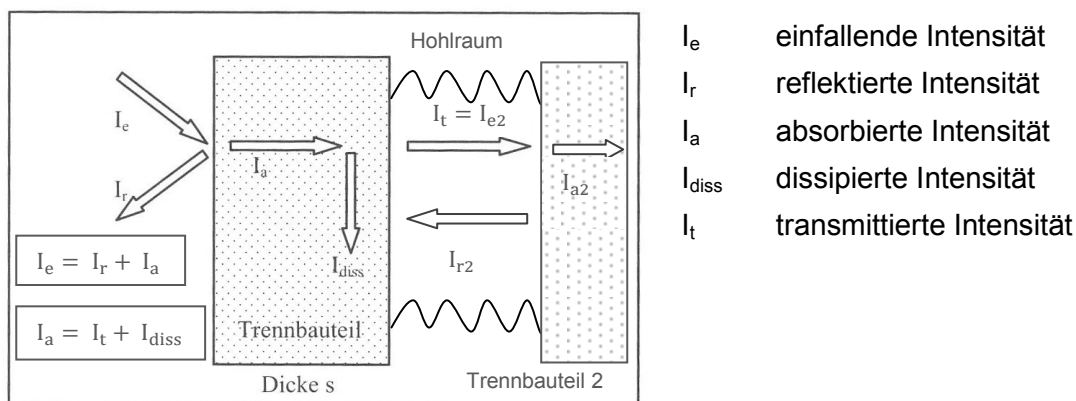


Abbildung 1: Schallintensitäten an trennenden Bauteilen, in Anlehnung an /9/

Sind Hohlräume über Öffnungen (z.B. Helmholtzresonatoren) oder über dünne Vorsatzschalen (z.B. Plattenschwinger) an das Schallfeld angekoppelt, kann es zu resonanzartig überhöhter Absorption einzelner Frequenzbereiche kommen. /3/

Bei der raumakustischen Planung und Prognoseerstellung werden verschiedene, dem Nutzungszweck entsprechende, Gütekriterien zur objektiven Beurteilung der raumakustischen Eigenschaften berücksichtigt. Diese werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

2.3 Raumakustische Kriterien

2.3.1 Übersicht

Das älteste und bekannteste raumakustische Gütemerkmal ist die Nachhallzeit (s. **Abschnitt 2.3.2**) eines Raumes. Die Tatsache, dass die frequenzabhängige Nachhallzeit im Allg. überall im Raum gleich ist, macht es erforderlich weitere Beurteilungskriterien heranzuziehen. Um unterschiedliche Platzbereiche hinsichtlich der Verhältnisse zeitlicher und räumlicher Verteilungen der eintreffenden Schallenergien charakterisieren zu können, werden sog. **Energiekriterien** verwendet. Große Bedeutung kommt dabei dem Energieanteil der Anfangsreflexionen zu, welche dem Direktschall bei Sprache in etwa 50 ms folgen. Späte Reflexionen treten nach ca. 100 ms auf und bestimmen den diffusen Klangeindruck.

Die folgende **Tabelle 1** bietet eine Übersicht über die wichtigsten raumakustischen Beurteilungskriterien und stellt - aufgrund der Vollständigkeit - Sprache und Musik gegenüber. /3/

Tabelle 1: Raumakustische Kriterien² und ihre Optimalwerte /3/, /9/

Höreindruck	Kriterium	Optimum	
		Sprache	Musik
Nachhall, Klangfarbe	Nachhallzeit T	ca. 1 s	ca. 2 s
	Anfangsnachhallzeit EDT	-	ca. 2 s
	Bassverhältnis BR	-	1,1 bis 1,3
Sprachverständlichkeit, Durchsichtigkeit	Deutlichkeitsgrad D_{50}	> 50 %	-
	Deutlichkeitsmaß C_{50}	> 0 dB	-
	Sprachübertragungsindex STI	> 50 %	-
	Artikulationsverlust für Konsonanten AL_{con}	< 15 %	-
	Schwerpunktzeit T_S	< 80 ms	100 bis 150 ms
	Klarheitsmaß C_{80}	-	-1 bis 3 dB
Lautstärke	Schalldruckpegelminderung ΔL	< 5 dB(A)	< 5 dB(A)
	Stärkemaß G	1 bis 10 dB	1 bis 10 dB
Raumeindruck	Seitenschallgrad LF	-	25 bis 40 %
	Seitenschallmaß $10\lg LF$	-	-7 bis -4 dB
	Hallmaß H	-	3 bis 8 dB
	Raumeindrucksmaß R	< 0 dB	1 bis 7 dB
spezielle Kriterien	Intimität I	-	10 bis 25 ms
	Echokriterium EK	< 1,8	< 1,8

² nähere Erläuterungen in angegebener Fachliteratur

Bei vielen Kriterien nach **Tabelle 1** handelt es sich um Größen, die aus Impulsantworten im Hörerraum abgeleitet werden können. Mittels der **Raumimpulsantwort** (s. **Abbildung 2**) lässt sich die Verteilung der eintreffenden Reflexionen an einem Hörerplatz darstellen und sie beschreibt theoretisch vollständig das örtliche Schallfeld. Deshalb zielen raumakustische Planungsmethoden auf die Bestimmung dieser Raumimpulsantwort ab und sind somit auch in der Lage, störende Reflexionen (Wahrnehmung als Echo) aus dem gleichmäßig abfallenden Reflexionsverlauf zu erkennen.

Im Allgemeinen stellt die Raumimpulsantwort eine Druck-Zeit-Funktion dar, welche auch als Pegel (Energie)-Zeit-Funktion oder Spannungs-Zeit-Funktion dargestellt werden kann.

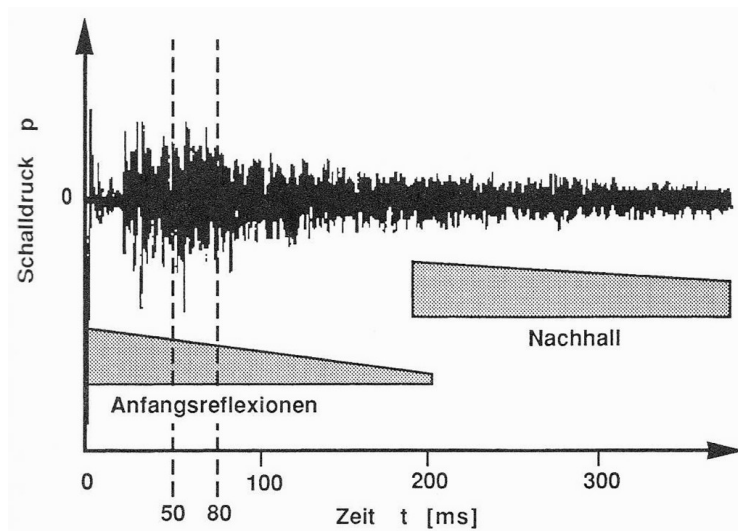


Abbildung 2: Beispiel einer Raumimpulsantwort /3/

Nach dem Direktschall, welcher für das Richtungshören (Physik der 1. Wellenfront) von Bedeutung ist, erreichen die nützlichen deutlichkeits- und klarheitserhöhenden Anfangsreflexionen den Empfänger, bevor die späten, schwächeren Reflexionen als Nachhall registriert werden. /3/, /9/, /11/

2.3.2 Nachhallzeit

Das am häufigsten verwendete raumakustische Merkmal ist der Nachhall eines Raumes. Darunter versteht man das langsame - für einen Raum charakteristische - Abklingen des Schalls nach Beendigung des Geräusches. Als **Nachhallzeit T** (*Reverberation Time RT*) bezeichnet man die Dauer des Abklingvorganges, nach der der Schalldruck auf 1/Tausendstel seines Ausgangswertes bzw. die Energiedichte im Raum auf 1/Millionstel abgefallen ist. Dies entspricht einer Schalldruckpegelminderung um 60 dB (s. **Abbildung 3**).

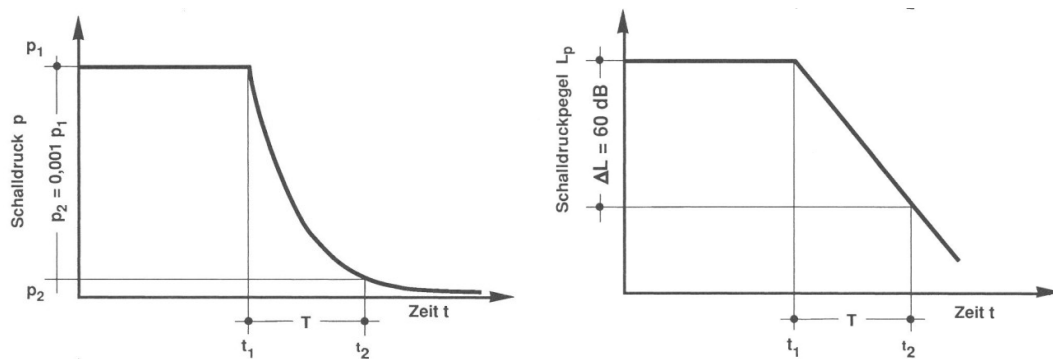


Abbildung 3: Nachhallvorgang für Schalldruck p und Schalldruckpegel L_p /3/

Wallace Clement Sabine erkannte am Anfang des 20. Jahrhunderts, dass die Nachhallzeit zwar in enger Beziehung zum **Volumen** V eines leeren Raumes und seiner **äquivalenten Schallabsorptionsfläche** A steht, jedoch ortsunabhängig ist. Da die Schallabsorptionseigenschaften in einem Raum im Allg. frequenzabhängig sind, ist auch die Nachhallzeit frequenzabhängig. Die Luftabsorption kann über eine **Energiedämpfungskonstante** m berücksichtigt werden.

$$T = - \frac{\ln(10^{-6}) 4V}{(A * 4mV) * c_0} = 55,3 * \frac{V}{(A * 4mV) * c_0} = 0,163 * \frac{V}{(A * 4mV)} \quad (2-2)$$

c_0 Schallgeschwindigkeit in Luft, $c_0 \approx 340$ m/s

Da die Luftabsorption nur in sehr großen Räumen oder im Freien bei hohen Frequenzen von Bedeutung ist, wird der Term $4mV$ in der Praxis häufig vernachlässigt:

$$T = 55,3 * \frac{V}{A * c_0} = 0,163 * \frac{V}{A} \quad (2-3)$$

Die *Sabinesche Formel* gilt für die meisten Räume, die wir täglich betreten, jedoch nicht für Räume mit sehr stark absorbierenden Flächen ($\alpha > 0,3$). Ein weiteres Problem bei dieser Formel ist, dass die Absorptionsflächen gleichmäßig statistisch verteilt sein sollten und eine hohe Diffusität herrschen muss. Eine geringe Diffusität kann zu einer störenden Ortsabhängigkeit des Nachhalls und somit zu einer stellenweisen Verzögerung des Nachhallvorganges führen. Somit greift die *Sabinesche Nachhalltheorie* und damit die statistische Betrachtungsweise nicht mehr.

Für stark bedämpfte Räume (hohe Raumabsorptionsgrade α_{Raum}) mit niedrigen Nachhallzeiten, z.B. Tonstudios, empfiehlt es sich die Nachhallformel von *Eyring* anzuwenden:

$$T = 0,163 * \frac{V}{-\ln(1 - \alpha_{Raum}) * S_{ges}} \quad (2-4)$$

Je nach Raumnutzung werden bestimmte Nachhallzeiten und ein ausgeglichener Frequenzverlauf (d.h. nicht zu große Unterschiede in den einzelnen Frequenzbändern) angestrebt, um die Sprachverständlichkeit zu fördern (s. **Abbildung 4**).

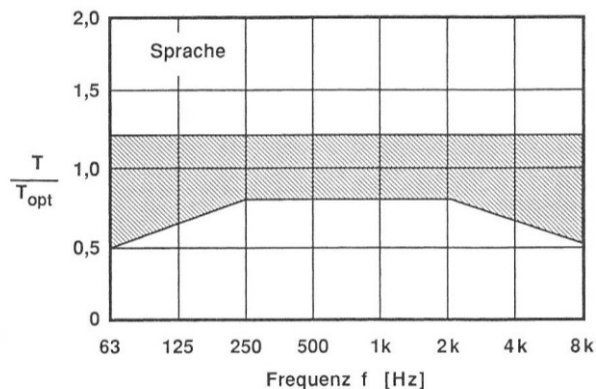


Abbildung 4: anzustrebender Bereich der Nachhallzeit für Sprache /3/

In der DIN 18041 /15/ werden für die Hörsamkeit in kleinen und mittelgroßen Räumen - der Nutzungsart (hier Sprache) entsprechende - optimale Nachhallzeiten T_{soll} in Abhängigkeit des Raumvolumens angeboten:

Sprache $T_{soll} = (0,37 * \lg(V) - 0,14)s \quad (2-5)$

Zu lange Nachhallzeiten führen zu einer halligen Akustik, schlechter Sprachverständlichkeit und einem verwaschenen Höreindruck. Zu geringe Nachhallzeiten sind ebenfalls unerwünscht, da überwiegend der Direktschall die Raumakustik bestimmt und die Primärstruktur des Raumes kaum Einfluss hat. /3/, /4/, /9/, /12/

2.3.3 Speech Transmission Index (STI/STI-PA)

Der **Speech Transmission Index** STI ist eine physikalische Größe zur Bestimmung der Sprachverständlichkeit in Räumen bzw. beim Einsatz elektroakustischer Übertragungssysteme. Dieses Beurteilungskriterium – abgeleitet aus der Modulationsübertragungsfunktion MTF - gibt an, inwieweit die Modulation der Sprache (Nutzschall, ≤ 50 ms am Ohr) bei Schallübertragung vom Sprecher zum Hörer durch Nachhall, Störgeräusche sowie sämtliche Signalveränderungen verloren geht.

Das vorhandene Nutzsignal S (Signal) – interpretiert als amplitudenmoduliertes Rauschen – wird zum Störsignal N (Noise) ins Verhältnis gesetzt und dient der Ermittlung der MTF $m(F)$ in Abhängigkeit der Nachhallzeit T .

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f_{mod} * \frac{T}{13,8})^2}} * \frac{1}{1 + 10^{-\left(\frac{S}{N}\right)_{10dB}}} \quad (2-6)$$

f_{mod} Modulationsfrequenz in Hz

Für jeweils 14 Modulationsfrequenzen f_{mod} (Terzbänder 0,63 Hz bis 12,5 Hz) in 7 Oktavbändern (125 Hz bis 8 kHz) erfolgt die Bestimmung des STI, wobei frequenzabhängig nach männlicher und weiblicher Sprache gewichtet wird. Änderungen des STI von 0,03 sind gerade noch wahrnehmbar. /1/, /17/, /15/

In den STI sind folgende Parameter eingeschlossen /26/:

- Verhältnis Nutz- zu Störsignal
- Nachhallzeit
- Verhältnis Direkt- zu Diffusschall (Abstand Quelle – Empfänger)
- frühe Reflexionen
- späte Reflexionen (Echowirkung bei Verzögerungszeiten über 50 ms)

Mit diesem Index kann die Sprachübertragungsqualität an verschiedenen Stellen und bei verschiedenen Bedingungen innerhalb desselben Raumes verglichen werden. Dies schließt die Auswirkungen durch Präsenz von Zuhörern oder durch Veränderungen an der Beschallungsanlage ein.

Weil das STI-Verfahren sehr aufwendig ist, wird in der Praxis häufig mit den vereinfachten Verfahren *RASTI* (Rapid Speech Transmission Index) oder *STI-PA* (Speech Transmission Index for Public Address Systems) zur Beurteilung von Beschallungsanlagen gemessen. Beim STI-PA werden die 12 Modulationsfrequenzen auf alle 6 Frequenzbänder aufgeteilt (Die Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen 125 Hz und 250 Hz werden zusammengelegt.), so dass jedes Frequenzband mit 2 Frequenzen moduliert wird. /17/, /15/

In der nachfolgenden **Tabelle 2** wird der Zusammenhang zwischen dem STI und der Sprachverständlichkeit aufgezeigt:

Tabelle 2: STI und Sprachverständlichkeit /17/

STI	Sprachverständlichkeit
> 0,75 – 1,00	ausgezeichnet
> 0,60 – 0,75	gut
> 0,45 – 0,60	angemessen
> 0,30 – 0,45	schwach
≤ 0,3	schlecht

2.4 Beeinflussung der akustischen Raumeigenschaften

Die akustischen Eigenschaften eines Raumes sind, wie bereits erwähnt, von primären und sekundären Strukturen abhängig. Primäre Strukturen sind durch Raumform und -volumen zumeist vorgegeben und unveränderlich. Somit ist die zu betrachtende Stellgröße die Sekundärstruktur - in Form von Oberflächenabsorption und Einbauten. Nachfolgend werden einige Parameter näher erläutert.

2.4.1 Schallabsorptionsgrad und äquivalente Schallabsorptionsfläche

Der **Schallabsorptionsgrad** α - auch Schallschluckgrad genannt - ist u.a. abhängig von dem verwendeten Material, der Frequenz und der Art des Schalleinfalls. Er ist definiert als:

$$\alpha = \frac{I_a}{I_e} = 1 - r_r^2 \quad (2-7)$$

r_r Reflexionsfaktor

I_a absorbierte Schallintensität in W/m²

I_e einfallende Schallintensität in W/m²

Ist eine Oberfläche ausschließlich reflektierend ($\alpha = 0$), bezeichnet man sie als schallhart. Im Fall von absoluter Absorption ($\alpha = 1$) dringt die gesamte Schallenergie in das Material ein. Wenn dies für den gesamten Raum zutrifft, gilt er als schalltot bzw. unter realistischen Bedingungen als schallarm. Es kann vorkommen, dass Schallabsorptionswerte über dem Wert 1 (theoretisch unmöglich) angegeben werden. Dabei ist die wirksame absorbierende Fläche größer als die geometrische Fläche. Dieses Phänomen kann z.B. bei Kantenbeugungseffekten³ auftreten.

³ Durch Schallreflexion in Kantennähe von Absorbern kann sich eine erhöhte Absorption ergeben. Der Schall wird zum Absorber hin gebeugt z.B. bei wechselseitiger Anordnung von Flächen mit unterschiedlicher Impedanz.

Die Energie der Schallwelle wird entsprechend der Oberflächenabsorption α_i der Fläche S_i schrittweise verringert. Fasst man alle Flächen und deren Absorptionsgrad zusammen, ergibt sich die **äquivalente Schallabsorptionsfläche** A im Raum (gedachte geometrische Fläche mit hundertprozentiger Absorption, $\alpha = 1$).

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i = \bar{\alpha} S \quad (2-8)$$

Neben Raumbegrenzungsflächen tragen auch Einrichtungsgegenstände, Personen (mit A_j) und Luft (mit A_L) zur Absorption bei und werden mit berücksichtigt /9/, /21/:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^m n_j A_j + A_L \quad (2-9)$$

Zur kontrollierten Beeinflussung der Raumakustik werden vor allem technische Schallabsorber eingesetzt. In Hinblick auf deren Wirkung unterscheidet man zwischen **porösen Absorbern** (s. **Abschnitt 2.4.2**) und **Resonatoren** (**Abschnitt 2.4.3** f.).

2.4.2 Poröse Schallabsorber

Poröse Schallabsorber bewirken – Prinzip bedingt - eine breitbandige Absorption bei mittleren und hohen Frequenzen. Den Schallwellen soll beim Auftreffen ein möglichst geringer Widerstand entgegengesetzt werden. Die Umwandlung der Schallenergie in Wärme wird durch Oszillieren der Luftteilchen im Stoffinneren hervorgerufen. Das ist an die Existenz von Poren geknüpft, die so geschaffen sein müssen, dass Schallenergie eindringen und der Reibungsvorgang stattfinden kann. Der Materialwiderstand hängt von drei Materialkennwerten ab:

- ausreichende **Porosität** σ_M (Grundvoraussetzung für die Schallabsorption in porösen Materialien)
- möglichst kleiner **Strukturfaktor** s_{Str}
- längenbezogener **Strömungswiderstand** r_s (Bereich optimaler Anpassung)

In der folgenden **Abbildung 5** sind zur Erläuterung dieser Größen drei schematische Schnitte durch Dämmstoff gleicher Porosität, aber unterschiedlicher Porenstruktur dargestellt.

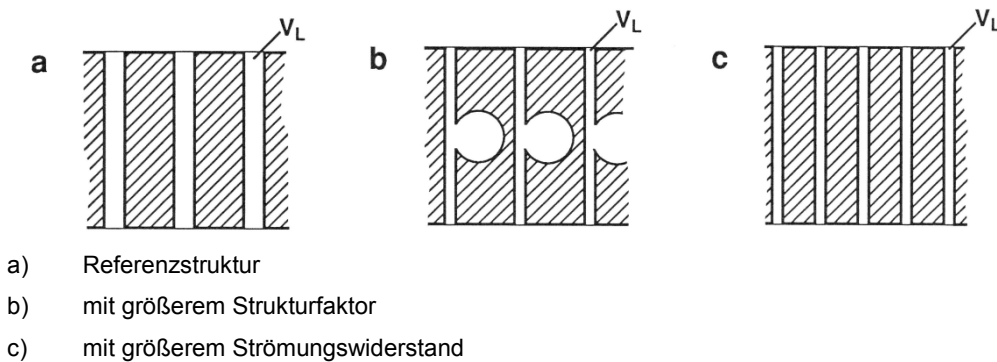


Abbildung 5: Modell poröser Stoff mit gleicher Porosität bzw. Porenvolumen V_L /3/

Für hohe Absorptionsgrade ist frequenzabhängig eine entsprechende **Absorberdicke** nötig. Poröse Absorber bedürfen demnach erheblichen Schichtdicken bei tiefen Frequenzen. Entsprechend **Abbildung 6** entfalten poröse Absorber dort ihre größte Wirkung, wo die Schallschnelle maximal ist.

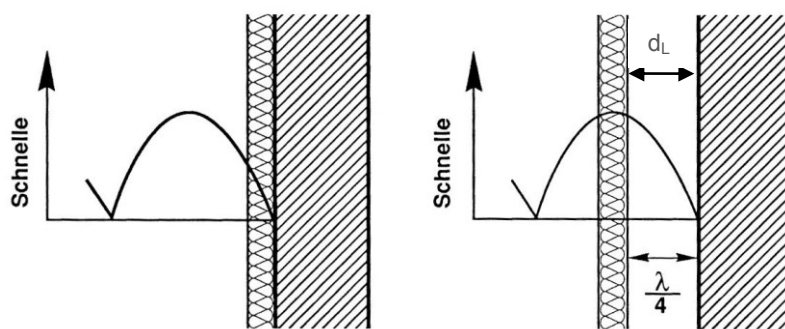


Abbildung 6: erhöhte Wirksamkeit des Absorbers im Schnellemaximum /3/

Der Absorber muss also nicht direkt auf die Wandoberfläche aufgebracht werden, sondern kann in einem **Abstand** $d_L = \lambda/4$ in Abhängigkeit der Wellenlänge λ vor der Massivwand angeordnet werden, was zu einer Einsparung der Absorberdicke führt. /3/, /9/

2.4.3 Plattenschwinger und Lochplattenschwinger

Plattenschwinger sind Resonanzabsorber zur selektiven Absorption bei tiefen und mittleren Frequenzen. Sie werden oft verwendet, um einen ausgeglichenen Frequenzverlauf der Nachhallzeit zu erreichen.

Durch die Montage dünner Platten mittels einer geeigneten Unterkonstruktion mit einem definierten Abstand d_L vor einer Wand oder einer Decke entsteht ein Feder-Masse-System. Die Platte wirkt dabei als Masse, die dahinter eingeschlossene Luft als Feder. Unter Einwirkung eines Schallfeldes führt die Platte Biegeschwingungen aus. Bei Anregung der Resonanzfrequenz des Plattenschwingers wird dem Schallfeld bei

dieser Frequenz viel Energie entzogen (hohe Schallabsorption) und in Bewegungsenergie umgesetzt.

Als Resonanzabsorber eignen sich dünne, dichte Materialien mit einer entsprechenden **flächenbezogenen Masse** m' , wie z.B. Gipskarton- und Sperrholzplatten, Holzverkleidungen, Glas oder steife Folien. Wird der Luftraum hinter der Platte mit losem, offenporigem Dämmstoff ausgefüllt, führt dies zu einer erhöhten Absorption in einem breiteren Resonanzbereich und zur Verminderung der Winkelabhängigkeit der Schallabsorption. Für die **Resonanzfrequenz** f_0 bei senkrechten Schalleinfall gilt:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (2-10)$$

m' flächenbezogene Masse der Platte in kg/m^2

s' dynamische Steifigkeit in N/m^3 bzw. $\text{kg/m}^2\text{s}^2$ (Luft: $s' = 1,4 \cdot 10^5 \cdot 1/a \text{ N/m}^2$)

a Dicke des Lufthohlraums in m

$$f_0 \approx \frac{510}{\sqrt{m' d_L}} \quad (2-11)$$

In der folgenden **Abbildung 7** ist die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz vom Wandabstand und der flächenbezogenen Masse dargestellt.

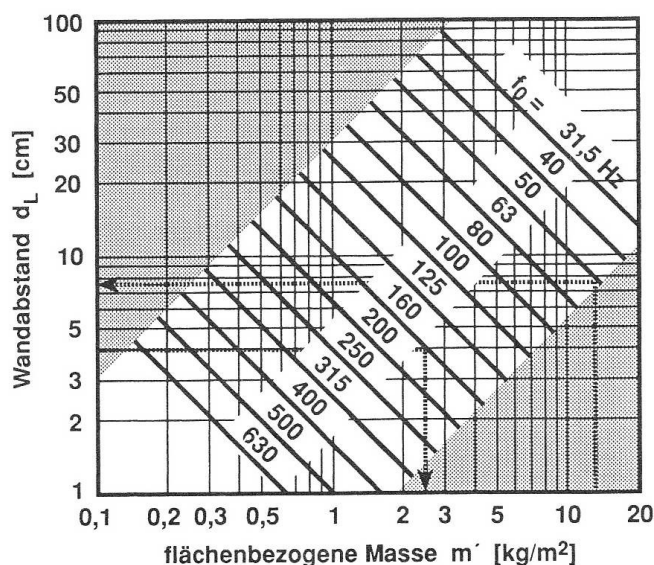


Abbildung 7: Resonanzfrequenz von Plattenschwingern /3/

Faustregel: Der Wandabstand d_L in cm sollte mindestens doppelt so groß, wie die Plattenmasse in kg/m^2 sein.

Platten mit regelmäßig verteilten Öffnungen, sog. **Lochplattenschwinger**, verhalten sich ähnlich wie normale Plattenschwinger. Sie weisen aber aufgrund ihrer geringen

wirksamen Masse höher Resonanzfrequenzen auf. Statt m' wird eine **wirksame Lochmasse** m'_L betrachtet. Das ist die Masse der in den Löchern mitschwingenden Luft. /3/, /9/, /25/

2.4.4 Weitere Resonanzerscheinungen

Helmholtzresonator

Prinzipiell bestehen Helmholtzresonatoren aus einem Lochabsorber mit einem schwingenden Luftvolumen im Absorberhals. Sie sind für eine relativ schmalbandige Absorption bei tiefen Frequenzen geeignet und können in Hohlräumen eines Raumes (z.B. in Wand- oder Deckensimsen, in Wandverkleidungen oder im Gestühl) angeordnet werden. Die **Resonanzfrequenz** f_0 ist abhängig vom **Resonatorvolumen** V_{Res} (Federwirkung), dem Resonatorhals mit der **Querschnittsfläche** S_{Res} und der **Länge** t_{Res} (Massewirkung). Der Resonatorhalsquerschnitt sollte klein gegenüber der Wellenlänge sein.

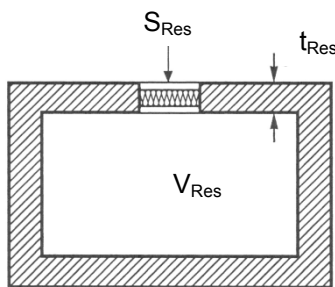


Abbildung 8: Prinzipdarstellung eines Helmholtzresonators /3/

Ein Dämmstoff im Hohlraum bzw. im Resonatorhals (Ort der größten Schnelle) bewirkt eine breitbandigere Resonanz, dient der Ankopplung des Resonators an das Schallfeld und entzieht diesem möglichst viel Energie. /3/, /9/

Hohlraumresonanz

Bei einem zweischaligen Aufbau sind zwei flächenbezogene Massen m'_1 und m'_2 über eine Feder mit einer **dynamischen Steifigkeit** s' miteinander verbunden. Wenn dieses doppelwandige System durch Luft- oder Trittschall zu Schwingungen angeregt wird - welche bei der **Hohlraumresonanzfrequenz** f_{H0} besonders groß sind - wirkt sich das nachteilig auf die Schalldämmung in diesem Bereich aus. Bei Nachhallzeitmessung in einem Raum wird jedoch durch das System dem Raum Energie entzogen, was zumeist einen positiven Einfluss auf die Raumakustik hat. /2/

$$f_{H0} = 160 \sqrt{s' * \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (2-12)$$

Ist der Hohlraum mit Luft gefüllt, ergibt sich - unter Beachtung der dynamischen Steifigkeit von Luft - folgende Gleichung in Abhängigkeit des **Schalenabstandes**⁴ e:

$$f_{H0} = 1900 \sqrt{\frac{1}{e} * \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (2-13)$$

Biegeeigenresonanz

Luftschall kann beim Auftreffen auf Platten diese zu „erzwungenen“ Biegewellen anregen. Aus diesen können, durch Reflexion an Rändern oder Inhomogenität, freie Biegewellen entstehen. Dieses zumeist bauakustische Schalldämmproblem von einschaligen Bauteilen zwischen zwei Räumen kann auf das Wirkungsprinzip von Einrichtungsgegenständen in einem Raum übertragen werden. Durch Anregung von **Biegeeigenfrequenzen** f_{n_v, n_w} ($n_{v,w} = 1, 2, 3, \dots$ Ordnung der Eigenfrequenz) einer ebenen, an den Rändern „aufgestützten“ und somit allseitig gelenkig gelagerten Platte (Länge l_v und Breite l_w) kann dem Raum in diesem Resonanzbereich viel Energie entzogen werden. Für die Schalldämmung ist dieser Bereich der erhöhten Schallübertragung jedoch unerwünscht.

$$f_{n_v, n_w} = \left(\frac{n_v^2}{l_v^2} + \frac{n_w^2}{l_w^2} \right) * \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B'}{m'}} \quad (2-14)$$

Die **Biegesteifigkeit** B' , welche von den Materialeigenschaften der Platte abhängt, beeinflusst das Vorkommen freier Biegewellen (Plattenresonanzen) der Platte. /3/

$$B' = \frac{Ed^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (2-15)$$

$$f_{n_v, n_w} = \left(\frac{n_v^2}{l_v^2} + \frac{n_w^2}{l_w^2} \right) * \frac{\pi}{2} \frac{c_L d}{\sqrt{12(1 - \mu^2)}} \quad (2-16)$$

- E Elastizitätsmodul in Pa
- d Plattendicke in m
- μ Querkontraktionszahl
- c_L Longitudinalwellengeschwindigkeit in m/s

⁴ Abstand zwischen den zwei flächenbezogenen Massen

2.4.5 Schallabsorption durch Raumbegrenzungsflächen, Publikum, Gestühl und Luft

Auch ohne den Einsatz von technischen Schallabsorbern findet durch nachstehende **Raumbegrenzungsflächen** eine unvermeidbare Schallabsorption in Räumen statt:

- Teppiche (poröse Schallabsorber für hohe Frequenzen)
- Bodenbeläge mit festen Oberschichten (Absorption mittlerer Frequenzen)
- hohlliegende Holzböden (z.B. Parkett, Dielen zur Absorption tiefer Frequenzen)
- Fenster (höhere Absorption tiefer Frequenzen durch Schalltransmission)
- akustisch transparente Decke (z.B. Gitterrost erhöht Transmissionsgrad)
- Bühnen (abhängig vom Aufbau steigt Schallabsorption mit zunehmender Frequenz)
- Lüftungs- und Klimaanlage (schwer einschätzbar)

Schwer zu beurteilen ist die absorbierende Wirkung des **Publikums**. Die Besetzungsdichte und die individuellen Unterschiede der Kleidung (poröse Schallabsorber) haben eine große Streubreite der Absorption zur Folge. Im Allgemeinen werden der Planung Mittelwerte zugrunde gelegt. Es ist zu berücksichtigen, dass an den Begrenzungen der bestuhlten Flächen von den Gängen her eine zusätzliche Schallbeugung (Kantenbeugung) in den Publikumsbereich hinein erfolgt. Die vom Publikum begrenzte Fläche wird somit um einen 0,5 m breiten Streifen vergrößert und trägt zur Absorption bei. /3/, /13/

Je nach **Art des Gestühls** variiert der Schallabsorptionsgrad. Polsterstühle absorbieren mehr Schallenergie als Holzstühle. Weiterhin muss nach besetzten und unbesetzten Gestühl unterschieden werden. Bei verschiedenen Darbietungen sollte der unbesetzte dem besetzten Zustand gleichen, damit sich auf die zu erwartenden akustischen Eigenschaften des Raumes mit Publikum eingestellt werden kann. /3/, /26/

Schallabsorption in **Luft** verhält sich exponentiell und kommt durch Reibungs-, Zähigkeits- und Wärmeleitungsverluste bei der Ausbreitung zustande. Sie macht sich nur in großen Räumen bemerkbar und ist abhängig von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte. Für die Energiedämpfungskonstante m bei Gasen und Flüssigkeiten gilt $m \sim f^2$. /3/, /9/

2.5 Reflexionswirkung von Flächen

Schallwellen werden reflektiert, wenn sie auf eine Fläche mit abweichender Impedanz zu bisherigen Wellenwiderständen treffen. Reflexionsvorgänge sind abhängig vom Verhältnis der Schallwellenlänge zu den Längs- bzw. Querabmessungen b der reflektierenden Fläche. Die Reflexionswirkung variiert frequenzabhängig bei Räumen mit Einbauten und Strukturen. Prinzipiell kann in drei mögliche Reflexionsformen unterschieden werden /3/:

- geometrisch gerichtete oder spiegelnde Reflexion an Strukturen ($\lambda < b$)
- ungerichtete diffuse Reflexion ($\lambda \approx b$)
- geometrisch gerichtete oder spiegelnde Reflexion an Grundflächen ($\lambda > b$)

2.5.1 Geometrisch gerichtete Reflexionen

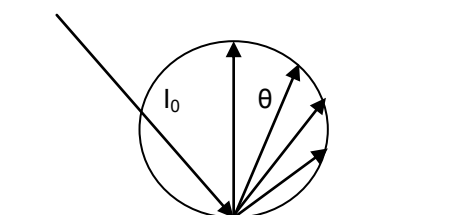
Wenn die Reflexionsfläche groß gegenüber der Wellenlänge ist (Abmessung $b > \lambda$), gilt entsprechend den optischen Gesetzmäßigkeiten: Einfallswinkel = Ausfallswinkel.

Bei spiegelnden Reflexionen an gekrümmten Flächen unterscheidet man zwischen konvex und konkav geformten Oberflächen. Bei ersterem werden die reflektierten Schallstrahlen gestreut und bei letzterem werden sie konzentriert (fokussiert). Neben der Gefahr störender Schallkonzentrationen können elliptische und parabelförmige Krümmungen von Teilflächen auch zur bewussten Schalllenkung dienen. /3/

2.5.2 Diffuse Reflexionen (Streuungen)

Als diffuse Reflexionen bezeichnet man die gleichmäßig in alle Raumwinkel verteilten Schallstrahlen. Diffus streuende Oberflächen werden durch den Diffusitätsgrad (wenn 1 \rightarrow gleichmäßige Reflexionsverteilung) oder den Streugrad (wenn 1 \rightarrow in Richtung der spiegelnden Reflexion wird keine Energie reflektiert) beschrieben. Wenn beide Parameter Null sind, kennzeichnet dies eine geometrisch gerichtete Reflexion. Oft können diese nur grob abgeschätzt werden. Weicht der Ausfallswinkel der reflektierten Schallstrahlen mehr als $\pm 10^\circ$ von der geometrisch gerichteten Reflexion ab, bezeichnet man diese Energieanteile als gestreut. Die Schallwellen werden, falls „perfekt diffus“, nach dem **Lambertschen Gesetz** (Wahrscheinlichkeitsverteilung) in alle Raumrichtungen zurückgeworfen.

$$I_{str} = I_0 * \cos\theta$$



(2-17)

Es ergibt sich eine Proportionalität zwischen der Intensität I_{str} des gestreuten Schalls und dem Kosinus des Ausfallswinkels der einfallenden Intensität I_0 . Die Strahldichte der Fläche nimmt mit flacher werdenden Winkel ab und ist unabhängig vom Einfallswinkel. /26/, /3/

Mit Hilfe der **Helmholtz-Zahl** He kann die Art der Schallausbreitung bestimmt werden. Sie ist eine dimensionslose Größe für das Verhältnis zweier Längen, der charakteristischen geometrischen Abmessung eines Hindernisses L zur Wellenlänge λ des Luftschalls.

$$He = \frac{L}{\lambda} \quad (2-18)$$

$He \gg 1$ große Körper, p und v in Phase (Ebene Welle) → Reflexion
 $He \approx 1$ Körperabmessungen entsprechen Schallwellenlänge → Streuung
 $He \ll 1$ kleine Körper p, v nicht in Phase → Beugung

Für hohe Frequenzen ist das Verhältnis zwischen Hindernisabmessung und Wellenlänge meist groß. Hinter dem Störkörper bildet sich eine Schattenzone aus. Wenn das Verhältnis sinkt, kommt es zunehmend zu diffusen Reflexionserscheinungen (s. **Tabelle 3**), welche bei $He \approx 1$ besonders ausgeprägt sind. Streukörper vermindern die mittlere freie Weglänge im Raum. Bei tiefen Frequenzen ist das Verhältnis meist klein. Die Schallwellen werden in die Schattenzone hinter dem Körper gebeugt. /20/

Tabelle 3: Mindestabmaße ($\lambda/2$) für die streuende Wirkung von Strukturen /3/

Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Wellenlänge [m]	2,72	1,36	0,68	0,34	0,17	0,08
Mindestabmaße von Strukturen [m]	1,35	0,70	0,35	0,17	0,09	0,04

2.5.3 Diffusoren

Sowohl die rein-spiegelnde als auch die rein-diffuse Reflexion stellen Grenzfälle dar. Zum einen ist es wichtig bei der raumakustischen Planung Hörerplätze ausreichend durch gerichtete Reflexionen mit Schallenergie zu versorgen, zum anderen sollen konzentrierte und energiereiche späte Reflexionen (Echos) vermieden werden. Diffuse Reflexionen werden durch vorgesetzte Strukturen erreicht, die aufgrund ihrer hohen Masse reflektierend wirken. Zur Reflexion von Sprache genügen 10 kg/m². Mit sinkender Frequenz steigt die nötige flächenbezogene Masse. /3/

Durch Diffusoren verteilt sich idealerweise die zurückgeworfene Energie gleichmäßig auf alle Richtungen. Somit kann den Raummoden in kleinen Räumen entgegengewirkt

werden. Ein örtlich inhomogenes Reflexionsverhalten kann durch Phasenverschiebungen in der Reflexion erreicht werden. Dies kann durch verschiedene Impedanzen oder durch geometrische Formen realisiert werden. /26/

2.6 Simulationsverfahren in der Raumakustik

Durch die Fortschritte in der Computertechnik ist es möglich, mathematische Simulationen von Räumen durchzuführen, um raumakustische Eigenschaften schon in der Planungsphase zu bestimmen. Bis vor ca. 30 Jahren wurden fast ausnahmslos Prognosen für die Qualität eines Raumes mit Hilfe von physikalischen Modellen erarbeitet. Trotz der rasanten Entwicklung der Computertechnik haben „altbewährte Methoden“, wie Faustformeln, Reflexionszeichnungen von Hand und maßstabsgerecht verkleinerte Modelle ihre Berechtigung behalten.

Zur Beschreibung des Schallfeldes bzw. der Schallausbreitung in einem Raum existieren verschiedene Ansätze. Neben der **wellentheoretischen Raumakustik** gibt es die **geometrische** und die **statistische Raumakustik**.

Eine physikalisch exakte Lösung der Wellengleichung soll die wellentheoretische Raumakustik liefern. Das Schallfeld wird vollständig durch den Druck und die Schnelle beschrieben. Die Raumbegrenzungsflächen werden durch ihre Impedanzen charakterisiert. Mit der wellenakustischen Analyse - vorwiegend in kleinen Räumen - können akustische Phänomene wie Raumresonanzen (modale Erscheinungen bei tiefen Frequenzen), Nachhallzeiten bei tiefen Tönen, Interferenzen, Beugung und Reflexion geklärt werden. Reale Räume mit komplizierten geometrischen Formen können nur schwer mit der Wellengleichung mittels numerischer Verfahren (z.B. Finite-Elemente-Methode FEM oder Boundary-Elemente-Methode BEM) beschrieben werden.

Die geometrische Betrachtung bietet mittels geradliniger Ausbreitung von Schallwellen eine Lösungsmöglichkeit für diese Bedingungen. Sie ist eine Näherung für Wellenlängen, die kleiner als die Raumstrukturen sind. Die Phasen der Wellen werden durch die Überlagerung vieler Eigenschwingungen als zufällig betrachtet. Daher werden Energien statt Amplituden addiert. Der Transport erfolgt modellhaft durch Teilchen bzw. Strahlen, die als schmale Ausschnitte aus einer Kugelwelle betrachtet werden. Trifft ein Strahl auf eine ebene Oberfläche, so wird er entsprechend dem geometrischen Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) reflektiert. Diese Betrachtungsweise gilt für die Zeit t bis ein stationärer Zustand im Raum erzielt wurde. Am Detektor werden Richtung, Länge (Weg, Laufzeit) und Intensität registriert. Durch Überlagerung vieler eintreffender Strahlen wird die Gesamtintensität an einem Punkt bestimmt. Bei fehlender Dämpfung des Mediums bleibt die Energie des Strahls konstant, wohingegen seine Intensität indirekt proportional zum Quadrat der

Entfernung sinkt. Mit den entsprechenden Verfahren (ab **Abschnitt 2.6.2**) kann die Raumimpulsantwort an einzelnen Raumpunkten bestimmt werden.

Nach Überschreitung der Zeit t hat sich ein diffuses Schallfeld im Raum ausgebildet. Die Schallenergiedichte ist im ganzen Raum konstant und der Schalleinfall ist gleichmäßig über alle Richtungen verteilt. Aufgrund der großen Anzahl direkter und reflektierter Strahlen können nur noch statistische Aussagen gemacht werden. Bei der statistischen Raumakustik spielen das Volumen V , die Raumbegrenzungsfläche S , das Absorptionsvermögen A und die Absorptionsgrade α eine Rolle. /10/, /11/

2.6.1 Übersicht

Nachfolgend eine Übersicht zu den Prognoseverfahren der Raumakustik:

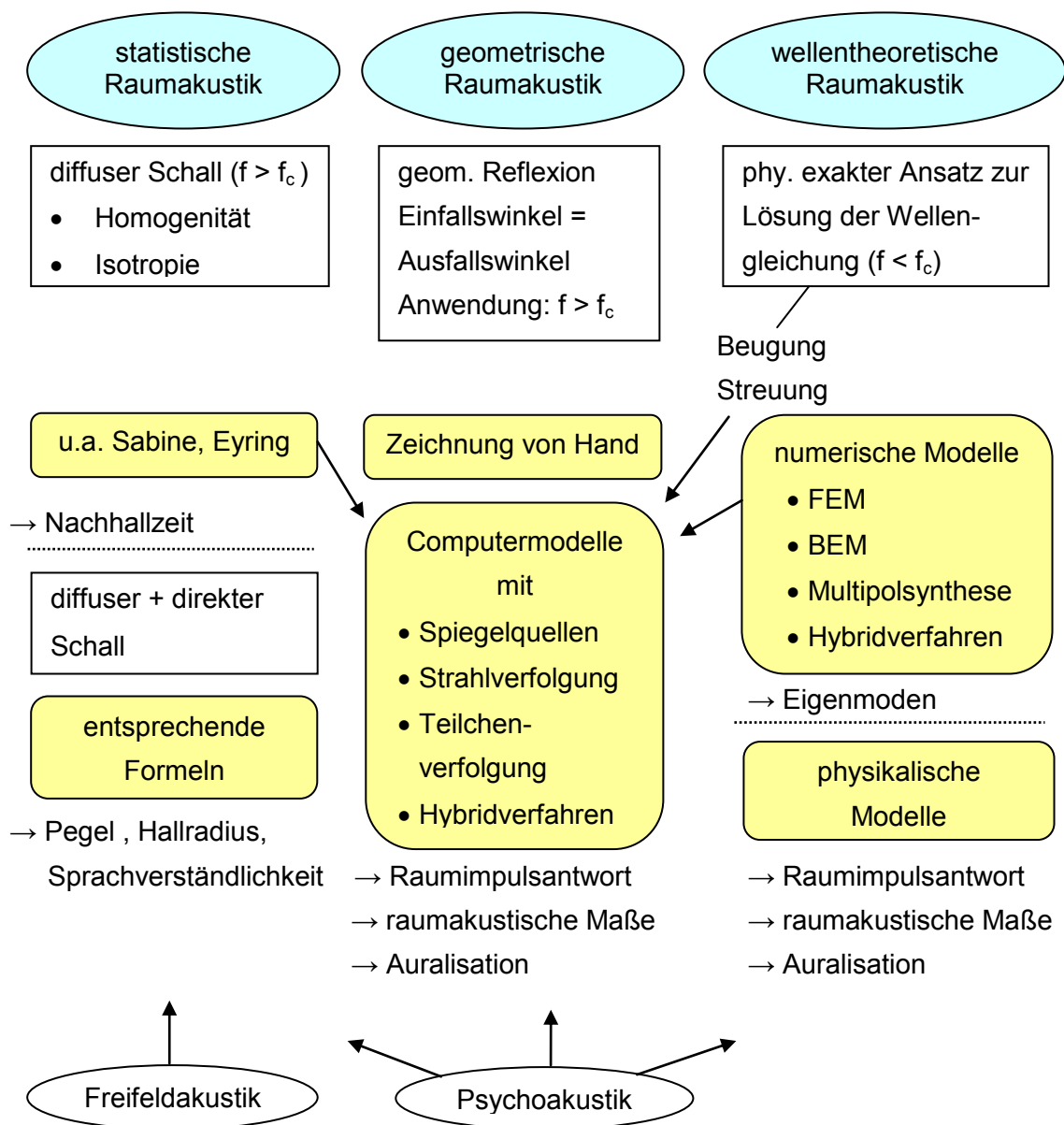


Abbildung 9: raumakustische Prognoseverfahren, in Anlehnung an /22/

Bei Computermodellen wird der Raum üblicherweise mittels eines CAD-(Computer Aided Design)-Programmes dreidimensional in einem Koordinatensystem dargestellt. Nach Vergabe der Flächendaten werden Quell- und Empfängerpositionen bestimmt. Änderung der Primär- oder Sekundärstruktur bzw. der Materialien können schnell simuliert und die Schallausbreitung berechnet werden.

Bei den üblich verwendeten Programmen basieren die Algorithmen auf dem geometrischen Ansatz. Durch die Vernachlässigung des Wellencharakters von Schall können zumeist Beugungs- und Streueffekte nicht erfasst werden, wodurch die Einsatzmöglichkeiten beschränkt sind. Oberhalb der Schroederschen Grenzfrequenz f_c sind diese Näherungswerte hinreichend genau.

Mit Computerprogrammen ist es möglich, viele und komplizierte Rechnungen sowie Approximationen an die Wirklichkeit vorzunehmen und nicht nur rein geometrisch zu simulieren. Durch die Einführung frequenzabhängiger Streugrade (meist grob geschätzt) ist es möglich, diffuse Streuungen zu berücksichtigen. Allerdings muss damit die Raumgeometrie nicht so genau modelliert werden. Jedoch stellt sich der weite Frequenzbereich als besonderes Problem dar. Optimalerweise müsste die Raummodellierung für verschiedene Frequenzbereiche mehrfach mit variabler Auflösung durchgeführt werden.

Mit Simulationsprogrammen wird die Möglichkeit geboten, spezielle Probleme besser zu untersuchen und mit wenig Aufwand interessierende Parametervariationen vorzunehmen. Aufgrund der zunehmenden Länge der Impulsantwort und des Rechenaufwandes werden mitunter Computermethoden mit statistischen Verfahren kombiniert, somit kann auch eine Rest-Nachhallkorrektur durchgeführt werden.

In der geometrischen Raumakustik sind die Spiegelschallquellen- und die Strahlverfolgungsmethode numerische Verfahren zur Berechnung von Schallfeldern in geschlossenen Räumen, welche nachfolgend näher erläutert werden. /10/, /7/, /13/

2.6.2 Spiegelschallquellenverfahren

Mit dem **Spiegelschallquellenverfahren** lassen sich räumliche Reflexionsvorgänge durch Schallstrahlen darstellen. Dieses indirekte Verfahren nutzt Spiegelschallquellen SSQ (z.B. S' - SSQ 1. Ordnung, S'' - SSQ 2. Ordnung), welche über die Raumbegrenzungen hinaus gehen, um geometrisch gerichtete Reflexionsvorgänge an ebenen Flächen darzustellen.

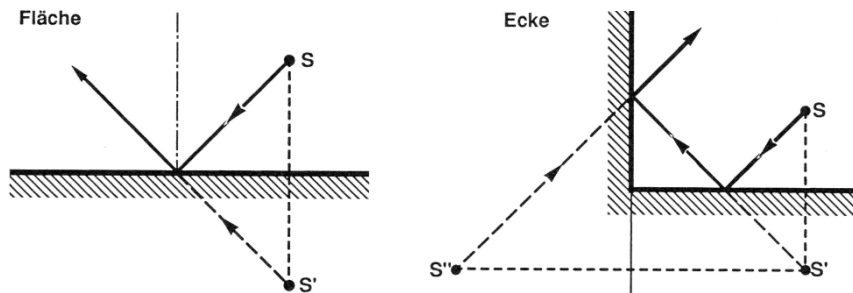


Abbildung 10: geometrisch gerichtete Reflexionen /3/

Dieses Verfahren liefert jedoch keine diffusen Reflexionen, welche bei höherer Reflexionsordnung und Laufzeit überwiegen würden. Alle gefundenen Spiegelschallquellen müssen einer Sichtbarkeitsprüfung unterzogen werden. Es wird geprüft, ob der in einer Wandfläche ermittelte Reflexionspunkt innerhalb der Begrenzungen der realen Wand ist und ob der Schallweg nicht verdeckt wird. Das Prinzip der Spiegelschallquellenmethode ist in der folgenden **Abbildung 11** dargestellt.

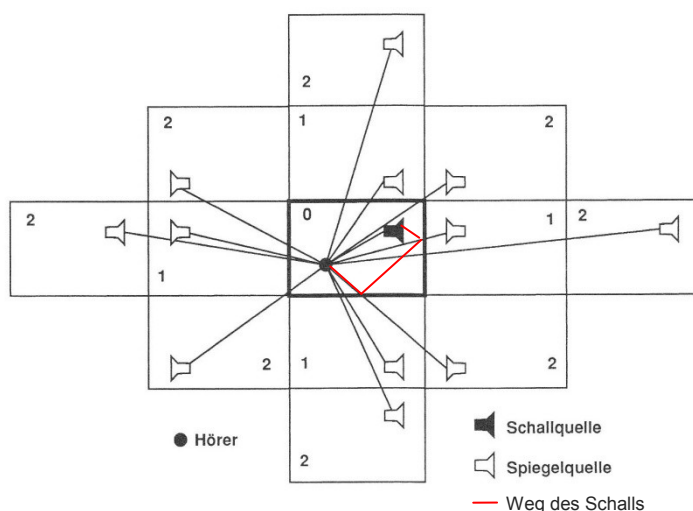


Abbildung 11: Prinzip des Spiegelschallquellenverfahrens /3/

Die Beiträge aller Reflexionen werden erfasst und hinsichtlich Intensität, Zeit und Einfallsrichtung bewertet. Der Energieverlust ergibt sich aus der geometrischen Verdünnung, der Luftdämpfung und der Flächenabsorption.

Der Absorptionsgrad der Oberflächen wird bei jeder Reflexion berücksichtigt. Durch Überlagerung der Impulsantworten aller Spiegelschallquellen und unter Berücksichtigung der Laufzeiten ergibt sich die schalldruckbezogene Raumimpulsantwort. Mit zunehmender Ordnung der Spiegelquellen steigen die erforderliche Rechenzeit und die Genauigkeit für jeden ausgewählten Hörerplatz.

Im leeren Raum ist die Anzahl nötiger imaginärer Quellen proportional zum Quadrat der Zeit. Mit zunehmender Komplexität der Geometrie und Möblierung erhöht sich die Rechenzeit dementsprechend. Um den Rechenaufwand zu vermindern, bricht man das

Verfahren meist vorzeitig ab, extrapoliert aus der berechneten Nachhallzeit einen exponentiell abklingenden „Nachhallschwanz“ und fügt beide Teile zur gesamten Raumimpulsantwort zusammen. Abbruchkriterien können sein: Quellordnung, Energieminimum und Zeit.

Diese Methode arbeitet „rückwärts“, d.h. ausgehend vom Empfänger wird der Strahlengang zum Sender mit Hilfe von Spiegelschallquellen konstruiert und ist für kurze Impulsantworten $t_{\max} < 150$ ms (hohe Zeitauflösung), kleine Wandzahlen und einfache Quaderräume sinnvoll. /3/, /18/, /11/

2.6.3 Strahlverfolgungsverfahren (Ray Tracing)

Die Algorithmen des Ray Tracing beruhen auf Erkenntnissen der geometrischen Raumakustik: Sie basieren, ausgehend von einer Quelle, auf der Verfolgung virtueller geradliniger Strahlen (Energietransport) in einem virtuellen 3D-Raum.

Jeder Strahl repräsentiert einen Ausschnitt aus einer Kugelwelle mit einer entsprechenden Anfangsenergie. Mit zunehmender Laufzeit vergrößert sich dessen Querschnitt.

Die Krümmung der Wellenfront kann aufgrund der hohen Anzahl ausgesandter Strahlen und sehr kleiner Raumwinkel vernachlässigt werden. Der Publikumsbereich ist in einzelne Detektorfelder oder -punkte unterteilt. Streift ein Strahl einen solchen Detektor, so wird dessen Auftreffzeit, Einfallrichtung und laufzeitabhängige Energie registriert. /3/

Es gibt verschiedene Ray-Tracing-Methoden:

- *Foreward Ray Tracing* (Strahlen werden vom Sender zum Empfänger verfolgt.)
- *Backward Ray Tracing* (Strahlen werden vom Empfänger zum Sender verfolgt.)

Neben der Darstellung des Energietransports in Form eines Schallstrahls, z.B. als Kegel oder Pyramide, kann man auch die Ausbreitung von Schallteilchen betrachten. Der Begriff „Schallteilchen“ wird oft als Synonym für Strahlen gebraucht. Erst bei der Detektion am Empfänger wird zwischen „Schallstrahl“ und „Schallteilchen“ unterschieden. Entweder die Strahlen oder die Empfänger sind räumlich ausgedehnt. Wenn die Empfänger als Volumenelemente dargestellt werden, spricht man bei dieser Art der Strahlverfolgung von einem Teilchen- statt Strahlenmodell. Wenn die Strahlen räumlich ausgedehnt sind, handelt es sich um ein Strahlenmodell. /13/

2.6.4 Cone Tracing

Beim Cone Tracing sind die Strahlen als Kegel mit kreisförmigem Querschnitt dargestellt. Diese Strahlen überlappen sich, um alle Raumboflächen erfassen zu können und scannen den Raum nach Spiegelschallquellen, wie bei dem Spiegelschallquellenverfahren, ab. Berücksichtigt werden nur die Spiegelschallquellen, deren Schallkegel den Detektor auch erfassen.

Der Rechenaufwand steigt exponentiell mit zunehmendem Abstand des Empfängers zur Schallquelle, da sich der Schallkegel mit steigender Entfernung erweitert. Deshalb eignet sich dieses Verfahren eher zur Berechnung der ersten Reflexionsordnungen. Es können nur so viele Spiegelschallquellen pro Reflexionsordnung gefunden werden, wie Strahlen ausgeschildt wurden. Durch eine Abstandsabfrage kann festgestellt werden, ob der Immissionspunkt im Kegel liegt.

Das Cone Tracing liefert jedoch keine diffusen Reflexionen, welche bei höheren Reflexionsordnungen überwiegen. Der Vorteil besteht in der gerichteten Strahlenauswahl über die unterschiedlichen Raumwinkel hinweg. /13/

2.6.5 Schallteilchenverfahren

Das Schallteilchensimulationsverfahren ist eine verwandte Methode der Strahlverfolgung. Von einer Schallquelle wird möglichst gleichzeitig und quasi-zufällig eine große Anzahl (einige 10.000) an Teilchen unter einer statistisch vorgegebenen Winkelverteilung als Energieträger ausgesandt. Die ausgesandten Teilchen repräsentieren einzelne Frequenzbereiche. Mit konstanter Geschwindigkeit breiten sich die Teilchen geradlinig auf Strahlen aus. Die Richtcharakteristik einer Quelle kann durch raumwinkelabhängige Variation der Teilchendichte bzw. der Teilchenenergie realisiert werden. Die Nachbildung der Wandabsorption kann zum einen durch:

- **Energieverringern** bei konstanter Teilchenzahl realisiert werden, wobei die Teilchenenergie beim Auftreffen auf ein Hindernis mit dem Reflexionsgrad $(1 - \alpha)$ multipliziert wird. Der Abbruch der Verfolgung erfolgt durch die max. Laufzeit oder wenn durch die Energiereduzierung ein bestimmter Pegelwert eines Teilchens erreicht wird. Die andere Möglichkeit ist die:
- **Teilchenannihilation** bei konstanter Teilchenenergie. Dabei wird jeweils eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 gezogen, wobei die Teilchenverfolgung abgebrochen wird, wenn die Zahl kleiner als der Absorptionsgrad ist. Wenn die Anzahl der Reflexionen einen vorgegebenen Wert überschreitet, wird das Verfahren ebenfalls beendet.

Der teilchenvernichtende Algorithmus ist bei gleicher Genauigkeit schneller. Für eine Auralisation, wo „lange Reflektogramme“ berechnet werden, ist die Methode der Energieverminderung vorzuziehen.

Die Reflexion an Raumbegrenzungsflächen und Hindernissen kann:

- geometrisch gerichtet, aber auch
- teilweise diffus oder
- vollständig diffus,

unter Berücksichtigung eines entsprechenden Streugrades, erfolgen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Spiegelschallquellenmethode.

Bei diffusen Reflexionen wird beim Auftreffen des Teilchens auf ein Hindernis eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 gezogen. Wenn diese kleiner als der Streugrad ist, wird der Strahl diffus gestreut und die Energie um den Faktor $(1 - \alpha)(1 - \delta)$ vermindert. Unter statistischen Gesichtspunkten wird das Schallteilchen in mehrere Teilchen aufgeteilt.

Die Detektorfelder der Zuhörerfläche z.B. in Form 1-lagig ausgedehnter Schichten von Quadern registrieren Eintreffzeit, -richtung und Energie der Teilchen. Einzelne Empfänger können durch Zählkugeln repräsentiert werden. Es muss durch die Ausdehnung des Empfängers auf Mehrfachdetektion geprüft werden, da er auf verschiedenen Wegen erreicht werden kann.

Die Berechnung endet, wenn die Länge der Impulsantwort oder die vorgegebene Anzahl an Reflexionen erreicht wurde. Aus dem berechneten Reflektogramm können die gewünschten raumakustischen Kriterien abgeleitet werden.

Diese Methode arbeitet im Prinzip „vorwärts“. Beim Aussenden ist noch nicht bekannt, zu welcher Zeit welcher Empfänger getroffen wird. Es ergeben sich lange Impulsantworten bei geringer Zeitauflösung.

In Abhängigkeit von der Komplexität der Raumgeometrie und der Genauigkeit erhöht sich die Rechenzeit. Durch hybride Ansätze kann bei ausreichender Genauigkeit die Rechenzeit gesenkt werden. Grundgedanke dabei ist, dass jeder detektierte Strahl zu einer „sichtbaren“ (hörbaren) Spiegelschallquelle gehört. Die Raumimpulsantwort kann also aus verschiedenen Teilen aufgebaut werden, z.B. einem frühen Teil mit schnell berechneten Spiegelschallquellen und einem „Nachhallschwanz“ aus den Ergebnissen des Ray Tracing. /3/, /18/, /6/, /11/, /13/

2.7 Simulationssoftware EASE

Mit der raum- und elektroakustischen Simulationssoftware **EASE** (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) ist es möglich - durch Erstellen eines 3D-Raummodells und dessen integriertem Soundsystem - raum- und elektroakustische Berechnungen durchzuführen. Die Eingabe der Raumgeometrie und Objekte (z.B. Mobiliar) in ein Drahtgittermodell erfolgt über ein CAD-Interface.

EASE besteht aus einer Anzahl von miteinander verbundenen Programmen und Programmmodulen, von denen einige selbständig sind. Das EASE-Hauptfenster *EASE Main* (Programm) ist das übergeordnete Fenster, von dem alle untergeordneten Fenster (Programmmodule) ausgehen.

Der erste Schritt zur Modellerstellung ist die Eingabe der geometrischen Raumdaten. Anschließend werden den raumbegrenzenden Flächen die akustischen Werte (Schallabsorptionsgrade $\leq 1,00$) zugeordnet. Diese werden vorrangig der EASE-Materialdatenbank entnommen. Die darin enthaltenen Materialien entstammen der Programmausstattung, den Herstellerangaben oder wurden selbst angelegt. Die Berechnung raumakustischer Kriterien macht es erforderlich, Lautsprecher - welche einer entsprechenden Lautsprecherdatenbank entnommen werden können - und Hörerflächen bzw. Hörerplätze in das Modell zu integrieren. Anschließend werden Nachhallzeiten und andere raumakustische Parameter berechnet.

Mit EASE ist es möglich die Ermittlung der Nachhallzeit mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren durchzuführen:

- Statistische Verfahren nach Sabine und Eyring
- Ray Tracing
- Spiegelschallquellenverfahren
- Hybridverfahren in AURA (Cone Tracing und Schallteilchenverfolgung)

Mittels der Vergabe von Streugraden im Modul **AURA** (Analysis Utility for Room Acoustics) können Oberflächenstrukturen an die realen Schallausbreitungsbedingungen angepasst werden (s. **Anlage A**). Durch die Modifikation verschiedener Raumparameter ist es möglich, die unterschiedlichsten Raumsituationen zu simulieren und die raum- und elektroakustische Wirkung zu testen.

Durch die Vernachlässigung von Beugungs- und Resonanzerscheinungen kann es zu abweichenden Ergebnissen bei der Prognoseerstellung führen.

3 Untersuchungsgrundlagen

3.1 Messobjekt

3.1.1 Vorstellung der Untersuchungsräume A und B

Der unmöblierte **Raum A** (s. **Abbildung 12**) ohne raumakustische Maßnahme (Nadelvliessteppich vorhanden) bildet die Basis der Untersuchungen.

Raumgeometrie

Länge:	4,8 m
Breite:	4,7 m
Höhe:	3,0 m
Raumvolumen:	67,7 m ³

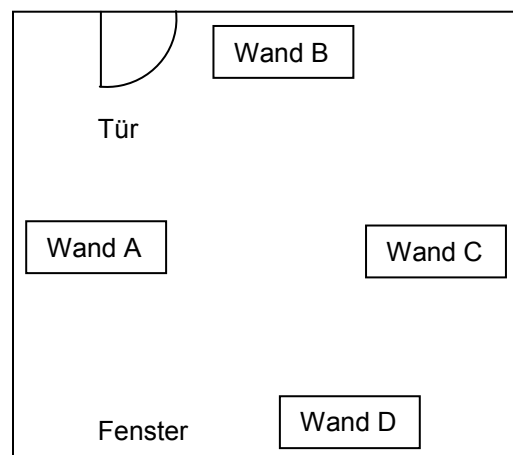


Abbildung 12: Raum A (Foto links, Grundriss rechts)

Raumbegrenzungsflächen Raum A

Decke:	Beton (ca. 22,6 m ²)
Boden:	Teppich < 5 mm dick (ca. 22,6 m ²)
Wand A:	Tapete auf Gipskartonplatten (ca. 14,4 m ²)
Wand B:	Tapete auf Gipskartonplatten (ca. 11,6 m ²) Holztür (ca. 1,8 m ²) Isolierglasfenster (ca. 0,7 m ²)
Wand C:	Tapete auf Gipskartonplatten (ca. 14,4 m ²)
Wand D:	Beton (ca. 4,5 m ²) Isolierglasfenster (ca. 8,0 m ²) 2 Heizkörper (jeweils ca. 0,8 m ²)

Durch Integration von zwei Deckensegeln (s. **Abbildung 13**) zur raumakustischen Optimierung ergibt sich der **Raum B**.



Abbildung 13: Deckensegel

Raumbegrenzungsflächen Raum B

Raumbegrenzungsflächen: entsprechend **Raum A**

raumakustische Maßnahme: 2 Deckensegel (jeweils ca. 4,9 m²)
(feinstrukturiertes Blech mit 2 cm Mineralwolle
hinterlegt, 200 mm totale Konstruktionshöhe)
mit je 2 Aluminiumleuchten (jeweils ca. 0,35 m²)

Die Schroedersche Grenzfrequenz f_c [s. **Formel (2-1)**] des unmöblierten **Raumes A** ($V = 67 \text{ m}^3$, $\bar{T} = 1,7 \text{ s}$ entsprechend **Anlage E: Tabelle 28-E**) liegt bei **ca. 317 Hz**. Unterhalb dieser Frequenz ist die Aussagequalität von Messungen und Berechnungen der Nachhallzeit verringert. Da aber ein programminternes Modellierungsproblem beleuchtet werden soll, welches davon unabhängig ist, werden auch unterhalb f_c liegende Frequenzen mit in die Untersuchungen einbezogen.

3.1.2 Messung der Nachhallzeit und STI-PA

Die Messverfahren für die Nachhallzeit nach DIN EN ISO 3382 und der Sprachverständlichkeit, nach DIN EN 60268-16 sowie die Geräte, Messbedingungen und der gemessene Grundgeräuschpegel werden in der **Anlage B** beschrieben.

Eine Übersicht über alle gemessenen Nachhallzeiten und STI-PA-Werte mit dreifacher Standardabweichung 3σ (99,73 %) sind in der **Anlage E** aufgeführt und dienen als Basis für die Simulationen mit EASE AURA (s. **Abschnitt 4**).

3.1.3 Einfluss verschiedener Parameter im Raum A

Bei der Messung der Nachhallzeit werden – wie einleitend schon erwähnt - folgende Parameter kumulativ erfasst, deren Wirkungen bei der Modellerstellung übertragen werden sollen:

- A) Raumabmaße → Wirken der Raummoden im tiefen Frequenzbereich
- B) Schallabsorption der Raumboflächen und der Objekte
- C) Schallstreuung durch die Oberflächenstrukturierung (z.B. Fenster, Heizkörper)

Einfluss Parameter A)

Exemplarisch werden für den unmöblierten **Raum A** die Raummoden (s. **Abbildung 14** oberste Kurve) – entsprechend der bewirkten Pegelerhöhung - im tiefen Frequenzbereich ($f < f_c$) ermittelt.

Durch das Einbringen von Objekten (z.B. Schränke, Regale) verändert sich die Lage der Reflexionsflächen, welche die Ausbildung der Raummoden beeinflusst und damit auch deren Einfluss auf die gemessene Nachhallzeit.

Im Sinne einer Plausibilitätsbetrachtung wird der reflektierende Einfluss eines Objektes auf die Ausbildung der Raummoden (untere Kurve) aufgezeigt. Am konkreten Beispiel wird die Breite des Raumes teilweise – durch das Einbringen eines Schrankes mit einer Tiefe von 0,4 m – von 4,7 m auf 4,3 m verringert.

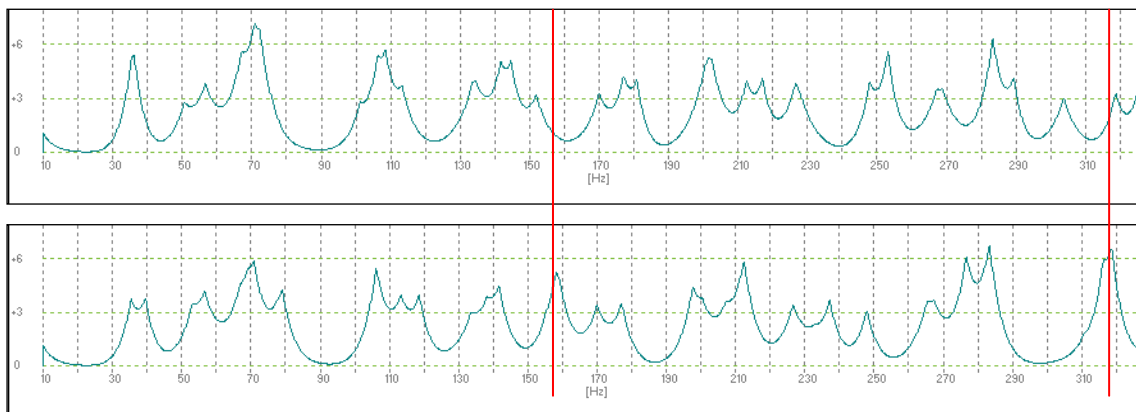


Abbildung 14: berechnete Raummoden im Raum A (ohne und mit Schrank)

Diese Änderung der Raumbreite bedingt z.B. die Ausbildung einer Raummode bei 158,1 Hz und bei 318,8 Hz (**rote Markierungen**), die im unmöblierten **Raum A** nicht vorhanden sind. Der Einfluss dieser Raummodenänderung ist bei der Erarbeitung des raumakustischen Berechnungsmodells - unter praktischen Gegebenheiten – nicht möglich, da sich gleichzeitig Schallabsorption und Streuung ändern.

Einfluss Parameter B)

Im **Raum A**, befinden sich - mit Ausnahme des Teppichs - ausschließlich schallreflektierende Oberflächen. Das Einbringen eines Schrankes (Näheres s. **Abschnitt 4.2.1**) verlagert den Schwerpunkt der Nachhallzeitbeeinflussung vorrangig in den Bereich der Absorption tiefer Frequenzen (Plattenschwinger). Im höheren Frequenzbereich weist der Absorptionseinfluss des Schrankes einen vergleichsweise marginalen Unterschied zu den restlichen Oberflächen auf.

Einfluss Parameter C)

In Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit (das Mindestabmaß für die Streuwirkung beträgt $\lambda/2$) treten Streuungen vorrangig im hochfrequenten Bereich auf. Erst durch die Integration von Mobiliar erhöht sich die Streuung im tieffrequenten Bereich. Bei Wellenlängen von ca. 0,3 m (1 kHz) bis 2,7 m (125 Hz) weist der Schrank (1,6 m x 1,2 m x 0,4 m) eine erhöhte Streuwirkung auf.

Diese „überschaubare“ Situation (ein Schrank) wird wesentlich verkompliziert, wenn mehrere Objekte im Raum vorhanden sind.

3.2 Festlegung der Eingangsparameter in EASE AURA

Folgende Eingangsparameter müssen im EASE-Modul AURA für die Simulationsberechnungen - basierend auf den Ray Tracing-Algorithmen Cone Tracing und Teilchenverfolgung - festgelegt werden:

- (1) *Particles* (Strahlen- bzw. Teilchenanzahl pro Lautsprecher)
- (2) *Length [ms]* (Laufzeit bzw. Länge des Echogramms)
- (3) *Default Value [%] for Surfaces without Scattering Data* (Streuanteil für Flächen ohne Streukoeffizienten)
- (4) *Number of Calculation Threads* (Anzahl simultaner Rechenalgorithmen)

Für diese Eingangsparameter werden von AURA entsprechend den Raumeigenschaften, z.B. der Raumgröße, Vorschläge gemacht, welche je nach gewünschter Genauigkeit und Rechenzeit individuell wählbar sind. Es ist ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und erforderlicher Rechenzeit anzustreben.

(1) Partikelanzahl

Die Partikelanzahl pro Lautsprecher ist in Abhängigkeit der Raumgröße, der Oberflächenanzahl, der Anzahl der Schallquellen, sowie der Laufzeit und der gewünschten Genauigkeit zu wählen. Je höher die Anzahl der Partikel, umso dichter

bzw. größer werden Echogramm⁵ und Genauigkeit. Bei einfachen Räumen wirken sich die vorgeschlagenen Größen der Partikelanzahl nur unwesentlich auf die Rechenzeit aus. Aufgrund einer möglichst „intensiven Raumabtastung“ wird die Einstellstufe mit der größten Anzahl an Partikeln – **Very High Resolution, Slow** – für alle folgenden Simulationen gewählt, um den statistischen Fehler durch die endliche Partikelanzahl gering zu halten.

(2) Laufzeit

In AURA werden - entsprechend der erwarteten Nachhallzeit - Laufzeiten vorgeschlagen. Die Laufzeit sollte so gewählt werden, dass die Amplitude des reflektierten Schalls möglichst klein wird. Am Beispiel des **Raumes A** wird der Einfluss der Laufzeit auf die berechnete Nachhallzeit untersucht. Die Berechnungsergebnisse für drei unterschiedliche Laufzeiten sind in der **Tabelle 4**, für die Hörerposition HP 1 (entspricht der Empfängerposition E 1 in der **Anlage B: Abbildung 46-B**) zusammengefasst. Sämtliche andere Parameter entsprechen den Standardeinstellungen (s. **Seite 34**).

Tabelle 4: Variation der Laufzeit, 20 % Streuung, 78.000 Partikel, HP 1

Frequenz [Hz]	Laufzeit [s]			Messung
	User-Defined (1,00)	Long (2,88)	Extended, Slow (4,36)	
	Nachhallzeit [s]			
125	1,86	2,23	2,24	2,24
250	1,92	2,43	2,42	2,44
500	1,87	2,25	2,25	2,25
1000	1,43	1,49	1,50	1,50
2000	0,95	0,98	0,99	0,97
4000	0,76	0,79	0,80	0,79

Erkennbar ist, dass eine ausreichend hohe Genauigkeit erreicht wird, wenn die Laufzeit $\geq \hat{T}$ (erwartete mittlere Nachhallzeit) beträgt. Bei Wahl einer zu geringen Laufzeit ist mit einem Restnachhallfehler (vorwiegend ≤ 500 Hz) zu rechnen und eine zu hohe Laufzeit geht mit einer erhöhten Rechenzeit einher. Die Einstellstufe **Long** (entspricht ca. der mittleren erwarteten Nachhallzeit) wird deshalb als Standard festgelegt.

(3) Streuung

Da gängige Raumboflächen mal mehr oder weniger strukturiert sind und meist die genauen Streueigenschaften der Flächen nicht bekannt sind, haben Erfahrungswerte gezeigt, dass im Mittel eine statistische Streuung von 10 % bis 20 % pauschal für alle Flächen (gängiger Oberflächenbeschaffenheit) und über alle Frequenzen angenom-

⁵ speichert die an einem Ort, in einem Zeitabschnitt von jeweils 1 ms Breite, eintreffende Energie

men werden kann. Diese Festlegung in EASE gilt für alle Materialien, denen zuvor kein frequenzabhängiger Streukoeffizient zugewiesen wurde.

Da die Betrachtung der Räume mit Einrichtungsgegenständen im Vordergrund steht und mit größeren Streuungen zu rechnen ist, wird immer mit der Einstellstufe ***Slightly Structured Surfaces (20 %)*** gerechnet.

(4) Anzahl simultaner Rechenalgorithmen

Durch die Erhöhung gleichzeitig ablaufender Rechenalgorithmen kann, in Abhängigkeit der Rechnerleistung, die Rechenzeit verringert werden. Die Anzahl wird auf **4 Threads** festgelegt, weil ab da die geringste Rechenzeit mit dem verwendeten Rechner möglich ist.

resultierende Standardeinstellungen

Im Ergebnis der Parametereinstellung in EASE AURA zur Berechnung der Nachhallzeit des Testraumes werden – im Sinne eines sinnvollen Kompromisses zwischen Rechenzeit und Genauigkeit – folgende Berechnungsparameter der Bearbeitung zugrunde gelegt.

(1) <i>Particles:</i>	<i>Very High Resolution, Slow</i>
(2) <i>Length [ms]:</i>	<i>Long</i>
(3) <i>Default Value [%] for Surfaces without Scattering Data:</i>	<i>Slightly Structured Surfaces (20 %)</i>
(4) <i>Number of Calculation Threads</i>	<i>4 Threads</i>

Bei allen folgenden Simulationen werden diese Einstellungen als Standard festgelegt, wobei die Teilchenanzahl und die Laufzeit je nach Raumeigenschaften programmintern bei dieser Einstellstufe variieren können. Wird die vorgegebene Laufzeit [Parameter (2)] oder ein Energieminimum erreicht, wird die Berechnung abgebrochen.

In raumakustischen Simulationsprogrammen repräsentieren Hörerplätze oder –flächen die Sitzplätze späterer Zuhörer (wichtig bei der Sprachverständlichkeit) bzw. dienen der statistischen Aussagefähigkeit (z.B. bei der Nachhallzeit). Die Wahl dieser Plätze kann bei der Prognoseerstellung für raumakustische Maßnahmen entscheidend sein.

Die **Simulationsgenauigkeit** für die Nachhallzeit und den STI-PA - in diesem Testmodell - werden an den Hörerplätzen HP 1 bis HP 3 (Position der Hörerplätze entsprechend den Empfängerpositionen in **Anlage B: Abbildung 46-B** links) in der **Anlage D** untersucht.

4 Simulation mit EASE AURA

4.1 Basismodell Raum A/Modell Raum B

4.1.1 Messwerte als Simulationsbasis

Die gemessenen Nachhallzeiten (s. **Anlage E: Tabelle 28-E** und **Tabelle 29-E**) im Untersuchungsraum bilden die Grundlage für die Simulation mit der Raumsimulationssoftware EASE. Dieser Raum wird wie folgt unterteilt in:

- **Raum A** (ohne absorbierende Deckensegel) und
- **Raum B** (mit absorbierenden Deckensegeln)

Der **Raum A** dient als **Basismodell** zur iterativen Kalibrierung (Zuordnen der Schallabsorptionsgrade) der vorhandenen Raumbegrenzungsflächen. Die Iteration wird im Folgenden als ausreichend genau bewertet, wenn die Abweichung der gemessenen zu den berechneten Nachhallzeiten (Mittelwerte über alle Empfänger HP 1 bis HP 3) $\leq 0,03$ s beträgt. Parallel zu dieser Nachhallzeitkalibrierung erfolgt – im Sinne der Plausibilität – der Vergleich der gemessenen mit den berechneten STI-PA-Werten. Für diesen Parameter gilt, die Abweichung muss $\leq 0,05$ betragen, um als hinreichend genau eingestuft zu werden.

4.1.2 Kalibrierung Basismodell Raum A

In das Basismodell **Raum A** (s. **Abbildung 15**) werden drei Hörerplätze HP 1 bis HP 3 für die statistische Mittelwertbildung und die STI-PA-Ermittlung sowie ein Lautsprecher (OMNI-LSP⁶) integriert.

⁶ OMNI-LSP: Lautsprecher aus EASE-Datenbank mit allseitiger Abstrahlungscharakteristik

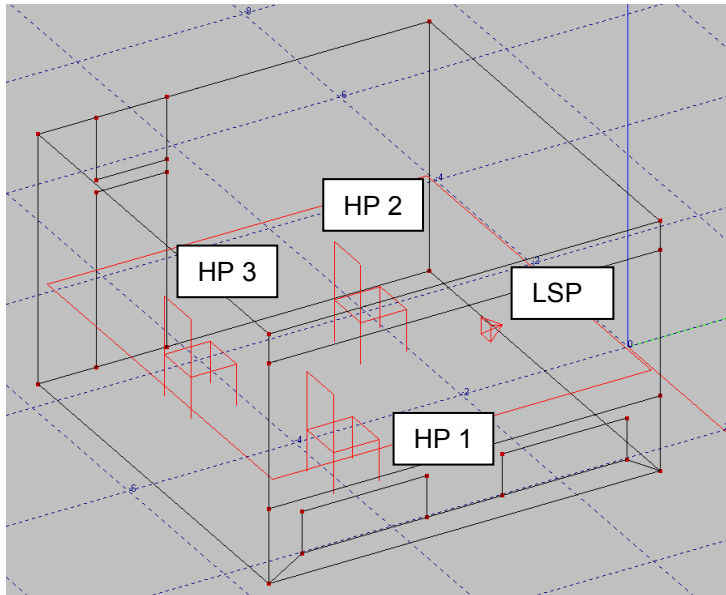


Abbildung 15: mit EASE erstelltes Raumgittermodell Raum A

Basierend auf den Standardeinstellungen des EASE-Moduls AURA werden die Berechnungen zur Bestimmung der Nachhallzeit und des STI-PA durchgeführt.

Im Ergebnis der iterativen Berechnungen werden den Raumbegrenzungsflächen (**Abschnitt 3.1.1**) die in der **Tabelle 5** zusammengefassten Schallabsorptionsgrade – entsprechend der Variationsbreite der Fachliteratur (s. **Anlage C: Tabelle 23-C**) – zugeordnet.

Tabelle 5: kalibrierte Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen mit AURA

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Beton	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
Tapete auf Gipskarton	0,03	0,02	0,02	0,04	0,06	0,07
Teppich (Materialstärke < 5 mm)	0,03	0,05	0,09	0,17	0,28	0,32
Isolierglasfenster	0,23	0,14	0,09	0,04	0,03	0,02
Holztür	0,13	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08
Heizkörper	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05

Eine Übersicht über alle weiteren – im Rahmen dieser Arbeit ermittelten – Absorptionsgrade ist in der **Anlage C: Tabelle 24-C** zu finden.

In der nachstehenden **Abbildung 16** ist das Ergebnis der Modellkalibrierung mit EASE AURA grafisch den gemessenen Nachhallzeiten gegenübergestellt. Zum Vergleich ist darüber hinaus der berechnete Nachhallzeitverlauf nach *Sabine* mit dargestellt.

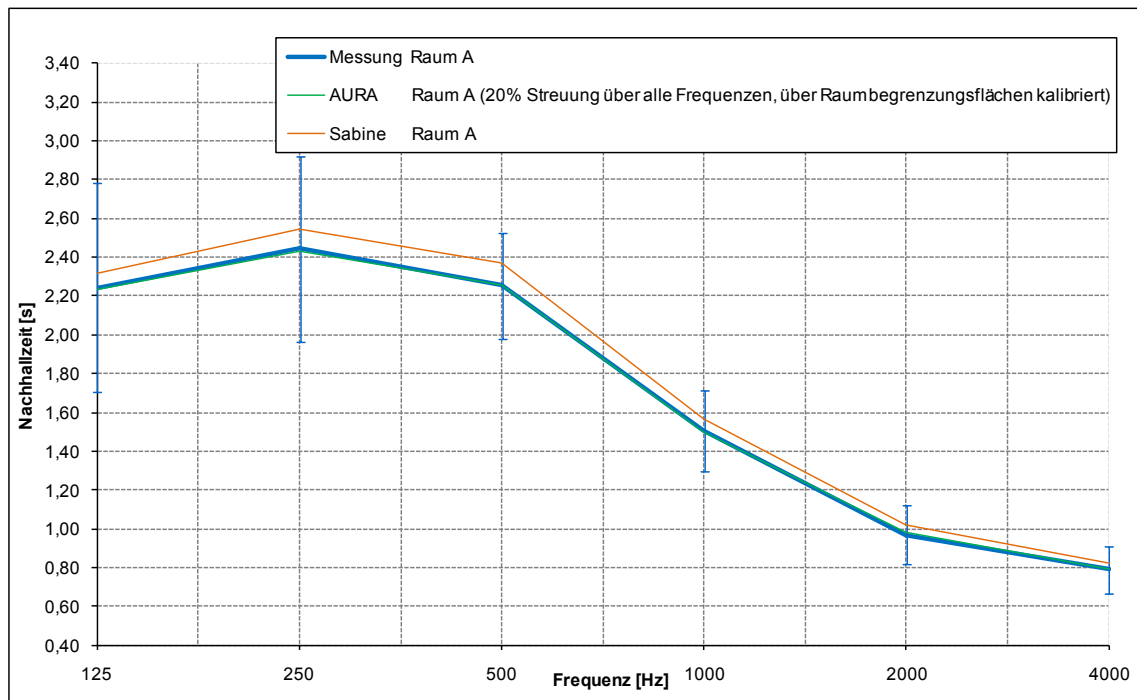


Abbildung 16: Gegenüberstellung Messung und kalibrierte Berechnung, Raum A

Durch die Kalibrierung des Modells **Raum A** sind die Kurvenverläufe von Messung (**dicke blaue Kurve**) und Berechnung mit AURA (**grüne Kurve**) nahezu identisch. Zusätzlich wurden - zur Information - die Ergebnisse der Nachhallzeitberechnung nach Sabine aufgenommen. Die Abweichungen im Frequenzbereich ≤ 1 kHz beruhen vorrangig darauf, dass die Modellkalibrierung mit EASE AURA mit einem pauschalen Streuanteil von 20 % ermittelt wurden. Dies führt zu einer „Unterbewertung“ der Schallabsorptionsgrade und damit bei der Sabine-Berechnung – ohne Berücksichtigung von Streuung - zu höheren Nachhallzeiten⁷.

Da die Betrachtung der Räume mit Einrichtungsgegenständen im Vordergrund steht und mit größeren Streuungen zu rechnen ist, wird – wie schon ausgeführt (**Abschnitt 3.2**) - immer mit 20 % Streuung gerechnet.

4.1.3 Kalibrierung Modell Raum B

Die sich durch den Einbau der Deckensegel ergebende Nachhallzeitreduzierung ist abhängig von den Absorptionsgraden der Deckensegel, dem Deckenabstand (max. Absorption bei max. Schnelle $\rightarrow d_L = \lambda/4$), der Kantenbeugung und der Streuung. Der Deckenabstand des Absorbers beträgt ca. 180 mm, somit ist das Absorptionsmaximum bei einer Frequenz von ca. 476 Hz [$f = c/\lambda = c/(4d_L)$] zu erwarten.

Ausgehend vom Basismodell **Raum A** werden die beiden Deckensegel in das Berechnungsmodell nach dem „Aquariumprinzip“ integriert, d.h. der Kantenbeugungs-

⁷ Um ähnliche Ergebnisse mit EASE AURA zu erzielen, müsste man im tieffrequenten Bereich den Streuanteil für den **Raum A** auf ca. 6 % ansetzen.

effekt durch Impedanzänderung wird im Modell **Raum B** durch die zusätzlich dämpfende Wirkung der Seitenwände des Absorbers nachgebildet. Entsprechend der Messwerte werden die Absorptionsgrade der Absorberelemente im **Raum B** kalibriert, da keine Daten zu deren Absorptionseigenschaften vorliegen. Die in den Segeln integrierten Aluminiumleuchten erhalten „schallreflektierende“ Absorptionsgrade.

Analog zur Vorgehensweise der Kalibrierung des **Raumes A** werden die Absorptionsgrade der Deckensegel iterativ berechnet. Im Ergebnis der Iteration ergeben sich die in **Tabelle 6** ausgewiesenen Schallabsorptionsgrade.

Tabelle 6: Absorptionsgrade Deckensegel und Leuchten

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Deckensegel	0,13	0,37	0,79	0,79	0,43	0,03
Aluminium-Leuchten	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04

Mit diesem kalibrierten Berechnungsmodell ergibt sich der in **Abbildung 17** dargestellte Nachhallzeitverlauf mit EASE AURA.

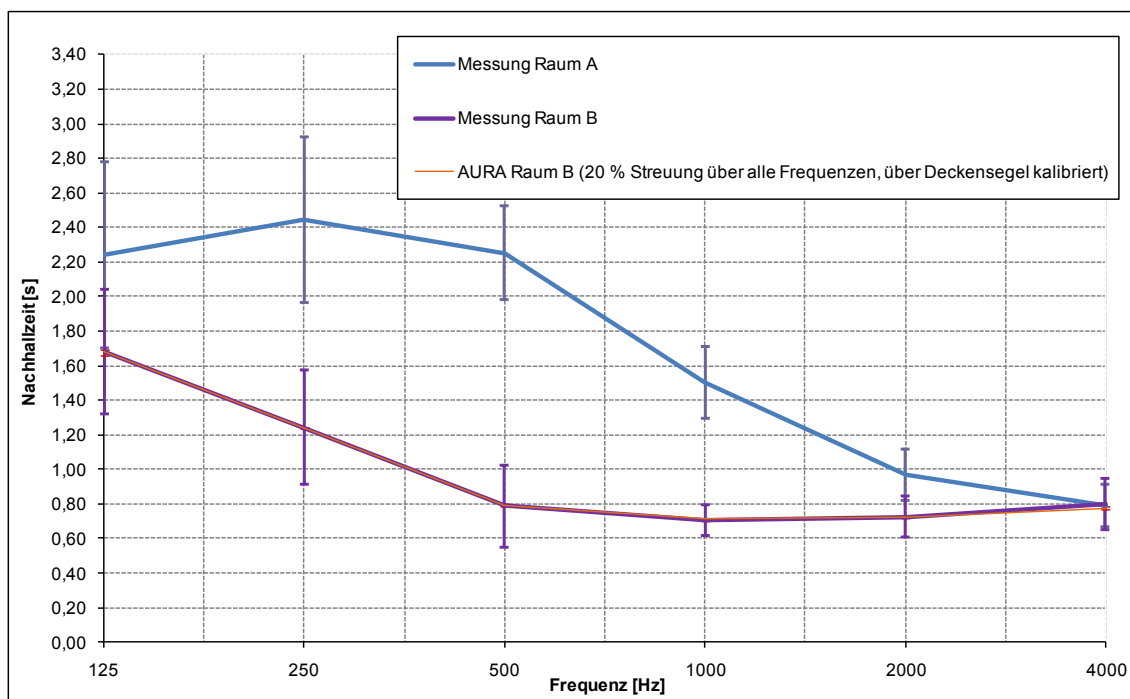


Abbildung 17: Gegenüberstellung Messung und kalibrierte Berechnung, Raum B

4.1.4 Kontrolle der Kalibrierung Raum A und B durch STI-PA

Um die Stimmigkeit der raumakustischen Verhältnisse nach der Kalibrierung über die Nachhallzeit im **Raum A** (Basismodell) und im **Raum B** zu prüfen, wird zusätzlich der STI-PA berechnet. Für diesen Zweck wird in den Modellen der Lautsprecher gegen eine TalkBox (MAN NORM) ausgetauscht und das gemessene Hintergrundgeräusch (s. **Anlage B: Tabelle 22-B**) in der Berechnung berücksichtigt. Die berechneten STI-PA-Werte werden in **Tabelle 7** den gemessenen STI-PA-Werten gegenübergestellt.

Im **Raum A** werden niedrigere Werte für den STI-PA erwartet als im **Raum B**, da längere Nachhallzeiten - lt. **Formel (2-6)** - die Sprachverständlichkeit herabsetzen. Das geringe Grundgeräusch (max. bei 160 Hz mit $L_{Leq} = 35,2$ dB) dürfte kaum zur Störung der Sprachverständlichkeit beitragen.

Tabelle 7: Gegenüberstellung Messung und Simulation STI-PA

Situation	HP	STI-PA _{mess}	STI-PA _{AURA}	STI-PA _{mess} - STI-PA _{AURA}
Raum A	HP 1	0,554	0,556	-0,002
	HP 2	0,508	0,543	-0,035
	HP 3	0,522	0,549	-0,027
Raum B	HP 1	0,674	0,666	0,008
	HP 2	0,632	0,649	-0,017
	HP 3	0,628	0,654	-0,026

Wie der **Tabelle 7** zu entnehmen ist, bewirkt die höhere Nachhallzeit im **Raum A** - im Vergleich zum **Raum B** - eine geringere Sprachverständlichkeit. Die Übereinstimmung von Messung und Berechnung ist am HP 1 – mit der besten Sprachverständlichkeit - am größten, da diese sich in direkter Abstrahlrichtung befindet. Am HP 2 und HP 3 liegen die STI-PA-Werte- trotz der Vernachlässigung von Beugungserscheinungen - über den Messwerten. Gründe dafür könnten abweichende Abstrahlcharakteristika der realen und der EASE-TalkBox sein oder nicht simulierbare Wellenphänomene. Die Abweichungen sind $\leq 0,04$ und entsprechen der Zielstellung der Genauigkeit der Kalibrierung von $\leq 0,05$ (s. **Abschnitt 4.1.1**).

Im Ergebnis dieses Untersuchungsteils ist zu konstatieren, dass Messung und Berechnung sehr gut übereinstimmen und somit die Berechnungsmodelle für die **Räume A** und **B** eine ausreichend hohe Genauigkeit aufweisen, um die weiterführenden Untersuchungen vornehmen zu können.

4.2 Prognoseberechnung Schrank

4.2.1 Schrank als Plattenresonator

Im Regelfall haben Einrichtungsgegenstände, wie Schränke und Tische schallreflektierende Oberflächen, z.B. aus Holz. Durch die dreidimensionale Gestaltung von Schränken ist die raumakustische Wirkung somit vorrangig auf Resonanzerscheinungen und Kantenbeugungseffekte im tief- bis mittelfrequenten Bereich zurückzuführen. Weiterhin verursacht die geometrische Form - einschließlich ihrer Unregelmäßigkeiten - Streuungen, welche sich im hochfrequenten Bereich auswirken können. Der hier betrachtete Schrank aus Sperrholz (**Abbildung 18**) hat eine Höhe von 1,6 m, eine Breite von 1,2 m, eine Tiefe von 0,4 m und ist nachstehend abgebildet:



Abbildung 18: Schrank

Aus der Geometrie und der konstruktiven Gestaltung ergeben sich verschiedene Möglichkeiten für die Ausbildung von Objektresonanzen (Plattenschwinger). Um diese These zu erhärten, werden verschiedene Resonanzfrequenzen des Schrankes berechnet und anschließend mit der Messung verglichen.

Plattenresonanz (Türplatten–Luft–Wand)

Basierend auf der **Formel (2-10)** wird - mit den nachfolgenden Kennwerten des Schrankes (vereinfacht als Plattenschwinger) - die Resonanzfrequenz $f_{0,\text{Schranktür}}$ orientierend berechnet. Es sei darauf hingewiesen, dass die realen Bedingungen von der Formelgültigkeit (senkrechter Schalleinfall, freie Plattenschwingung, massive Wand hinter Platte) teilweise abweichen.

dynamische Steifigkeit der Luft	$s' = 1,4 \cdot 10^5 \cdot 1/a \text{ N/m}^2$
Dicke des Lufthohlraumes	$a = 0,4 \text{ m}$
Plattendichte	$\rho \text{ (Sperrholzplatte)} = 520 \text{ kg/m}^3$
flächenbezogene Masse	$m' = 9,36 \text{ kg/m}^2 \text{ (bei 18 mm Dicke)}$

$$\rightarrow f_{0,\text{Schrantür}} = 31 \text{ Hz}$$

Hohlraumresonanz (Platte-Luft-Platte)

Mit Hilfe der **Formel (2-12)** und den folgenden Angaben kann die Hohlraumresonanzfrequenz des Schrankes berechnet werden.

dynamische Steifigkeit der Luft	$s' = 1,4 \cdot 10^5 \cdot 1/a \text{ N/m}^2$
Dicke des Lufthohlraumes	$a = 0,4 \text{ m}$
Plattendichte	$\rho \text{ (Sperrholzplatte)} = 520 \text{ kg/m}^3$
flächenbezogene Masse Türplatte	$m'_1 = 9,36 \text{ kg/m}^2 \quad (18 \text{ mm dick})$
flächenbezogene Masse Rückseite	$m'_2 = 1,56 \text{ kg/m}^2 \quad (3 \text{ mm dick})$

$$\rightarrow f_{H0} = 82 \text{ Hz}$$

Biegeeigenfrequenzen (Platten)

Die Biegeeigenfrequenzen der verschiedenen Platten werden mit der **Formel (2-16)** und den nachstehenden Daten ermittelt.

Plattendicke	$d = 0,018 \text{ m}$
Querkontraktionszahl	$\mu = 0,3$
Longitudinalwellengeschwindigkeit	$c_L = 2700 \text{ m/s}$
Plattenabmessung	$l_1 = 1,60 \text{ m} \times l_2 = 0,60 \text{ m} \quad \text{Türplatte (2x)}$
	$l_1 = 1,60 \text{ m} \times l_2 = 0,40 \text{ m} \quad \text{Seitenplatte (2x)}$
	$l_1 = 1,20 \text{ m} \times l_2 = 0,40 \text{ m} \quad \text{Schrantdecke}$

Türplatten	Seitenplatten	Schrantdecke
$\rightarrow f_{11} = 73 \text{ Hz}$	$\rightarrow f_{11} = 153 \text{ Hz}$	$\rightarrow f_{11} = 160 \text{ Hz}$
$\rightarrow f_{21} = 100 \text{ Hz}$	$\rightarrow f_{21} = 180 \text{ Hz}$	$\rightarrow f_{21} = 209 \text{ Hz}$

Durch entsprechende Oberschwingungen der berechneten Resonanzfrequenzen, deren Amplitude zu höheren Frequenzen hin abnimmt, kann es auch im mittelfrequenten Bereich zu einer Schalldämpfung kommen. Nicht das Material durch seine Strukturbeschaffenheit verursacht demnach die Nachhallzeitsenkung im tief- und mittelfrequenten Bereich, sondern hauptsächlich Resonanzerscheinungen.

4.2.2 Messung mit Schrank

Um die theoretischen Überlegungen messtechnisch zu überprüfen und eine „Kalibriergrundlage“ zu schaffen, wird im **Raum A** und **B** mit demselben Schrank gemessen. Damit realitätsnahe Bedingungen herrschen, wird der Schrank statistisch halbvoll mit Ordnern (bewirken breiteres Resonanzmaximum) bestückt und geschlossen. Die Standortabhängigkeit des Schrankes soll dabei eine untergeordnete Rolle spielen und wird nicht näher betrachtet. In der **Abbildung 19** wird zur besseren Anschaulichkeit die gemessene Nachhallzeit in Terzen dargestellt.

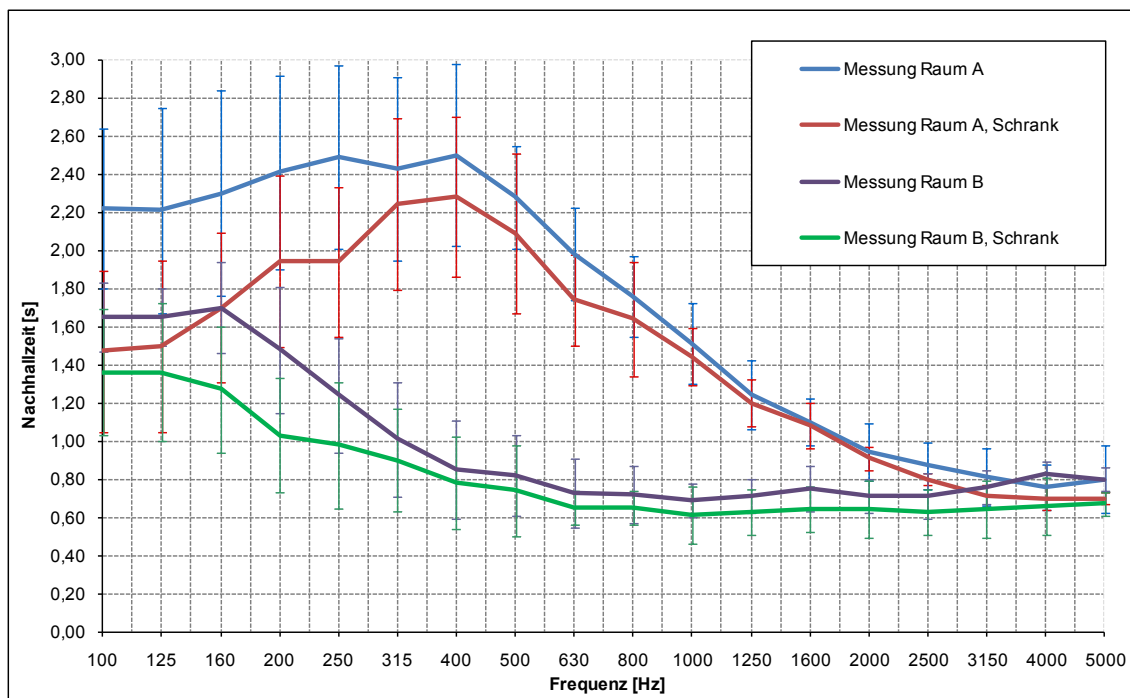


Abbildung 19: gemessene Nachhallzeiten mit Schrank im Raum A und B

Die Messkurven – insbesondere die des **Raumes A** – bestätigen, die theoretischen Überlegungen zu den schallabsorbierenden Wirkungen des Schrankes.

Die deutliche Senkung der Nachhallzeit im tieffrequenten Bereich kann **zusätzlich** durch die Beeinflussung einzelner Raummoden durch den Schrank hervorgerufen worden sein. Im bedämpften **Raum B** fällt die Nachhallzeitänderung durch den Schrank geringer aus.

Die nachfolgende **Abbildung 20** zeigt die theoretischen Nachhallzeitsenkungen nach *Sabine* entsprechend **Formel (2-3)** in unterschiedlich gedämpften Räumen ($V = 67,7 \text{ m}^3$, $A_1 = 4 \text{ m}^2$, $A_2 = 6 \text{ m}^2$) bei jeweilig gleichgroßer Änderung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche $\Delta A = 2 \text{ m}^2$ bei 125 Hz, z.B. durch einen Schrank.

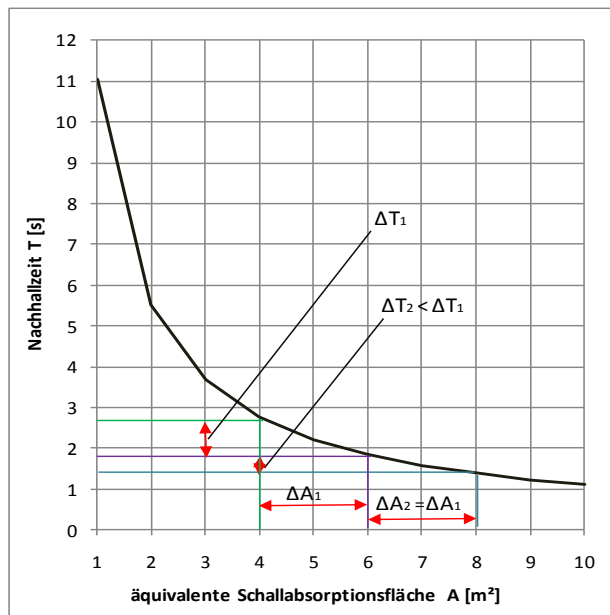


Abbildung 20: Einfluss der äquivalenten Schallabsorptionsfläche auf die Nachhallzeit

Wie bereits messtechnisch festgestellt, sinkt mit zunehmender äquivalenter Schallabsorptionsfläche im Raum der raumakustische Einfluss von Einrichtungsgegenständen auf die Nachhallzeit.

Im mittelfrequenten Bereich (bei ca. 315 Hz bis 800 Hz) machen sich bei der Messung die reflektierenden Schrankeigenschaften - durch die geringen Nachhallzeitänderungen in beiden Räumen - bemerkbar. Über 2500 Hz sinkt die Nachhallzeit – gegenüber der im leeren Raum – wieder. Es ist möglich, dass die ansteigende Absorptionswirkung in diesem Bereich auf die „hohen“ Absorptionsgrade des Teppichs zurückzuführen ist, weil der Schall vom Schrank zum Teppich reflektiert bzw. an Schrankunebenheiten gestreut wird.

4.2.3 Modellierung & Kalibrierung 3D-Schrank im Raum A

Da in EASE AURA nur Absorptions- und Streugrade vergeben werden können, um den raumakustischen Einfluss von Einrichtungsgegenständen zu simulieren, müssen die aus den Messungen resultierenden nachhallsenkenden Mobiliareigenschaften (Absorption, Streuung, Resonanz und Beugung) auf die Absorptions- bzw. Streugrade (alle Oberflächen mit 20 % Streuung, da keine Literaturangaben) übertragen werden. Das bedeutet, dass die in EASE verwendeten Absorptionsgrade für das Mobiliar bzw. die Streugrade für sämtliche Oberflächen von den realen Gegebenheiten abweichen. Durch Integration des 3D-Schranks - nach dem „Aquariumprinzip“ - in das Basismodell **Raum A**, erfolgt die Ermittlung der Absorptionswerte des Schranks durch Iteration an die Messwerte. Mit den in der **Tabelle 8** ausgewiesenen Absorptionsgraden wird die Übereinstimmung Messung/Berechnung erreicht. Aufgrund der

Übersichtlichkeit werden die Absorptionsgrade in Oktaven, welche aus Terzen berechnet wurden, ausgewiesen.

Tabelle 8: Absorptionsgrade 3D-Schrank

Mobiliar	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Schrank, 3D	0,55	0,23	0,14	0,13	0,24	0,37

4.2.4 Modellierung & Kalibrierung 2D-Schrank im Raum A

Da die 3D-Modellierung zeitaufwendig ist, wird – entsprechend der Aufgabenstellung der Diplomarbeit - im Folgenden untersucht, unter welchen Bedingungen ein 2D-Schrankmodell adäquate Ergebnisse zum 3D-Schrankmodell liefert.

Die schallabsorbierende 3D-Schrankfläche $S_{\text{Schrank},3D}$ umfasst alle Schrankoberflächen, die im Modell von den Schallteilchen erreicht werden. Überträgt man die gesamte Schrankfläche 1:1 auf das 2D-Modell (s. **Abbildung 21**), dann kann unter realen Bedingungen, wie z.B. bei Aufstellung mehrerer Schränke, die Größe der vorhandenen Wandfläche nicht ausreichend sein, um dieser die „Schrankabsorptionsgrade“ zuzuordnen. Aus diesem Grund wird als 2D-Schrankfläche nur die Fläche der Schrankfront verwendet.

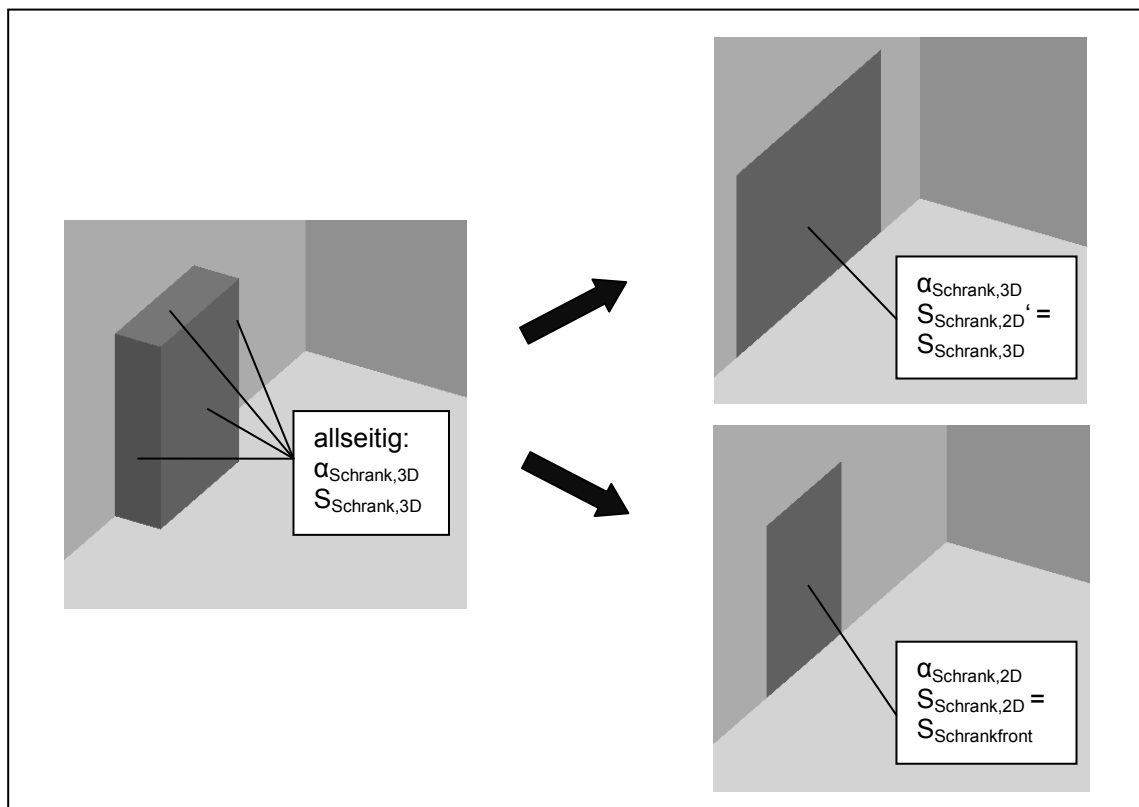


Abbildung 21: Prinzip der 3D-/2D-Modellierung Schrank

Ausgleich über Absorptionsgrade

Weil es mit EASE AURA nicht möglich ist über die Streukoeffizienten den dreidimensionalen Effekt des Mobiliars nachzubilden, wird der Absorptionsgrad zu Hilfe genommen. Aufgrund der Tatsache, dass alle Materialien die gleiche Streuung von 20 % aufweisen und weder Beugung noch Resonanz im Programm berücksichtigt werden kann, liegt die Vermutung nah, dass das Defizit des 2D-Schranks über einen flächenbezogenen Absorptionsgrad ausgeglichen werden kann. Dazu müsste die gering veränderte Strahlenführung durch die wegfallende Geometrie eine untergeordnete Rolle spielen.

Folgende These soll gelten: $A_{Schrang,3D} = A_{Schrang,2D}$

$$S_{Schrang,3D} * \alpha_{Schrang,3D} = S_{Schrang,2D} * \alpha_{Schrang,2D} \quad (4-1)$$

Durch Umstellen erhält man folgenden Umrechnungsalgorithmus:

$$\alpha_{Schrang,2D} = \frac{\alpha_{Schrang,3D} * S_{Schrang,3D}}{S_{Schrang,2D}} \quad (4-2)$$

Entsprechend der **Formel (4-2)** werden die 2D-Absorptionsgrade in Terzen von 100 Hz bis 5 kHz für die EASE-Datenbank berechnet und in folgender **Tabelle 9** ausgewiesen. Die 3D-Schrangfläche $S_{Schrang,3D}$ geht dabei mit 3,68 m² und die 2D-Fläche $S_{Schrang,2D}$ mit 1,92 m² in die Berechnung ein.

Tabelle 9: berechnete Absorptionsgrade Schrank $\alpha_{Schrang}$

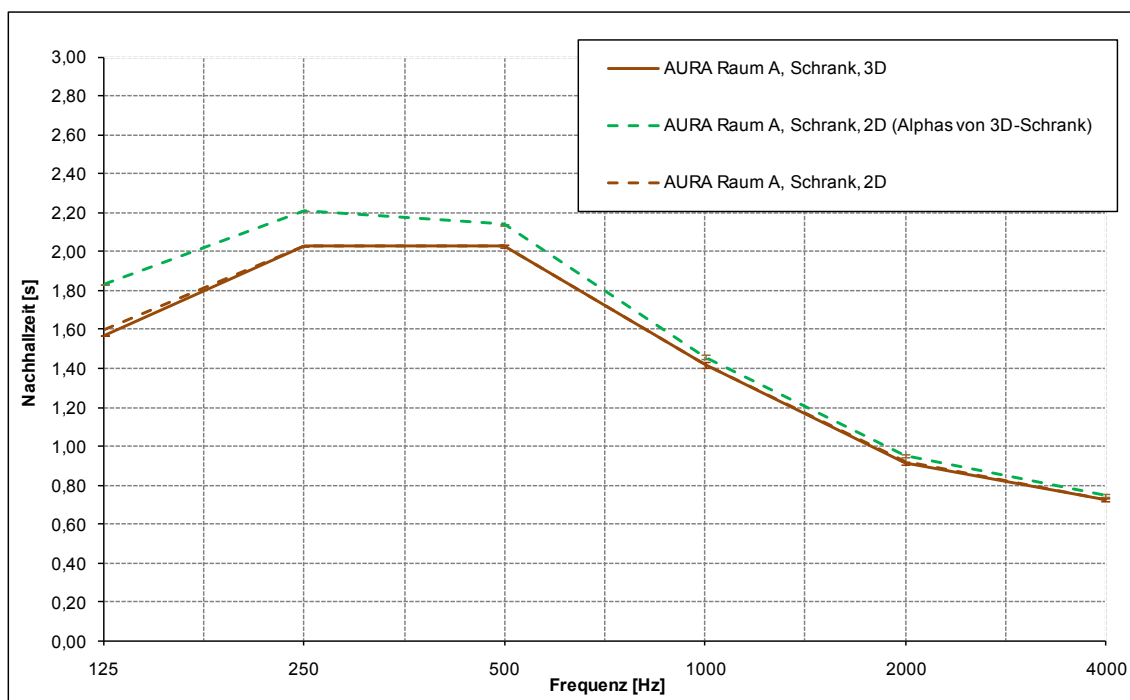
Frequenz [Hz]	$\alpha_{Schrang,3D}$	$\alpha_{Schrang,2D}$
100	0,60	1,15*
125	0,60	1,15*
160	0,45	0,86
200	0,30	0,58
250	0,22	0,42
315	0,18	0,35
400	0,16	0,31
500	0,14	0,27
630	0,12	0,23
800	0,12	0,23
1000	0,12	0,23
1250	0,14	0,27

Fortsetzung Tabelle 9: berechnete Absorptionsgrade Schrank $\alpha_{\text{Schränk}}$

Frequenz [Hz]	$\alpha_{\text{Schränk,3D}}$	$\alpha_{\text{Schränk,2D}}$
1600	0,19	0,36
2000	0,24	0,46
2500	0,29	0,56
3150	0,34	0,65
4000	0,38	0,73
5000	0,38	0,73

* Eingabe in EASE mit 1,00 (Erläuterung s. nächster Absatz)

In der **Abbildung 22** sind die simulierten Nachhallzeitverläufe grafisch gegenübergestellt.

**Abbildung 22:** Berechnungen mit 3D- und 2D-Schränk, Raum A

Wie in der **Abbildung 22** zu erkennen ist, sind die 3D- und 2D-Kurve nahezu identisch. Für diese Schränkgröße und Raumbedingungen ist die **Formel (4-2)** somit anwendbar und die These bestätigt. Die Vorgabe von maximal 0,10 s Differenz zwischen Simulation mit 3D- und 2D-Schränk wird eingehalten.

Weil Schränke Tiefenabsorber sind, kann sich für den tieffrequenten Bereich folgendes Problem ergeben:

Durch Umrechnung des 3D-Absorptionsgrades des Schränkes ergeben sich für die 2D-Absorptionsgrade u.U. Werte > 1,00, wodurch es zu Abweichungen kommen kann, da in der EASE-Datenbank nur Werte ≤ 1 realisiert werden können.

Dies ist der Fall, wenn das Flächenverhältnis von den Schrankseitenteilen zu der Schrankfront (entspricht 2D-Schrankfläche) zu groß ist. Bei dem untersuchten Schrank ergeben sich rechnerische $\alpha_{\text{Schrnk},2D}$ von 1,15 (100 Hz, 125 Hz). Bei Eingabe von $\alpha_{\text{Schrnk},2D} = 1,00$ in EASE hat das - im konkreten Fall bei diesen Frequenzen - allerdings keinen sichtbaren Einfluss auf das Ergebnis, da die Schrankfläche im Vergleich zu den Raumbegrenzungsflächen relativ klein ist.

Solange die 2D-Absorptionsgraden $\leq 1,00$ sind, ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation mit 2D- und 3D-Schrank zu erwarten. Unter der Annahme, dass Werte $> 1,00$ vorrangig im tiefen Frequenzbereich auftreten, soll anhand des nachfolgenden Rechenbeispiels das Verhältnis von Schrankseitenteilen zu Schrankfront ermittelt werden, ab dem Abweichungen auftreten können.

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{Schrnk},3D} &= 0,60 && (125 \text{ Hz}) \\ \alpha_{\text{Schrnk},2D} &= 1,00 && (\text{Begrenzung in EASE}) \\ S_{\text{Schrnk},2D} &= S_{\text{Schrnkfront}}\end{aligned}$$

Aus der **Formel (4-2)** abgeleitet, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\frac{\alpha_{\text{Schrnk},2D}}{\alpha_{\text{Schrnk},3D}} = \frac{S_{\text{Schrnk},3D}}{S_{\text{Schrnk},2D}} = \frac{S_{\text{Schrnkseiten}} + S_{\text{Schrnkfront}}}{S_{\text{Schrnk},2D}} = \frac{1,00}{0,60} \quad (4-3)$$

$$\frac{S_{\text{Schrnkseiten}}}{S_{\text{Schrnk},2D}} + 1 = \frac{1,00}{0,60} \quad (4-4)$$

$$\frac{S_{\text{Schrnkseiten}}}{S_{\text{Schrnk},2D}} = \frac{0,40}{0,60} \quad (4-5)$$

Ab einem Flächenverhältnis größer 40 % Schrankseitenteilen zu 60 % Schrankfront können Abweichungen der Nachhallzeit durch 2D-Absorptionsgrade $> 1,00$ auftreten.

Umso kleiner bzw. schmaler Schränke sind, umso mehr muss demnach mit Abweichungen gerechnet werden (s. Abschnitt 4.2.6).

4.2.5 Anwendung Umrechnungsalgorithmus im Raum B

Die Anwendbarkeit der **Formel (4-2)** für den Schrank soll nun in dem **Raum B** mit erhöhter äquivalenter Schallabsorptionsfläche (s. **Abbildung 23**) geprüft werden. Die Vermutung liegt nah, dass es durch Modenänderung zu Abweichungen zwischen Messung und Simulation kommt, da dieser Effekt nicht simulierbar ist. Die 3D- und 2D-Darstellung des Schranks sollte jedoch zu identischen Nachhallzeitverläufen führen. Die Übertragung von Absorptionsgraden (hier Schrank) in ein Raummodell mit anderen

Absorptionsverhältnissen ist ein bekanntes Problem von raumakustischen Simulationsprogrammen, weil es auf vielerlei Vereinfachungen basiert.

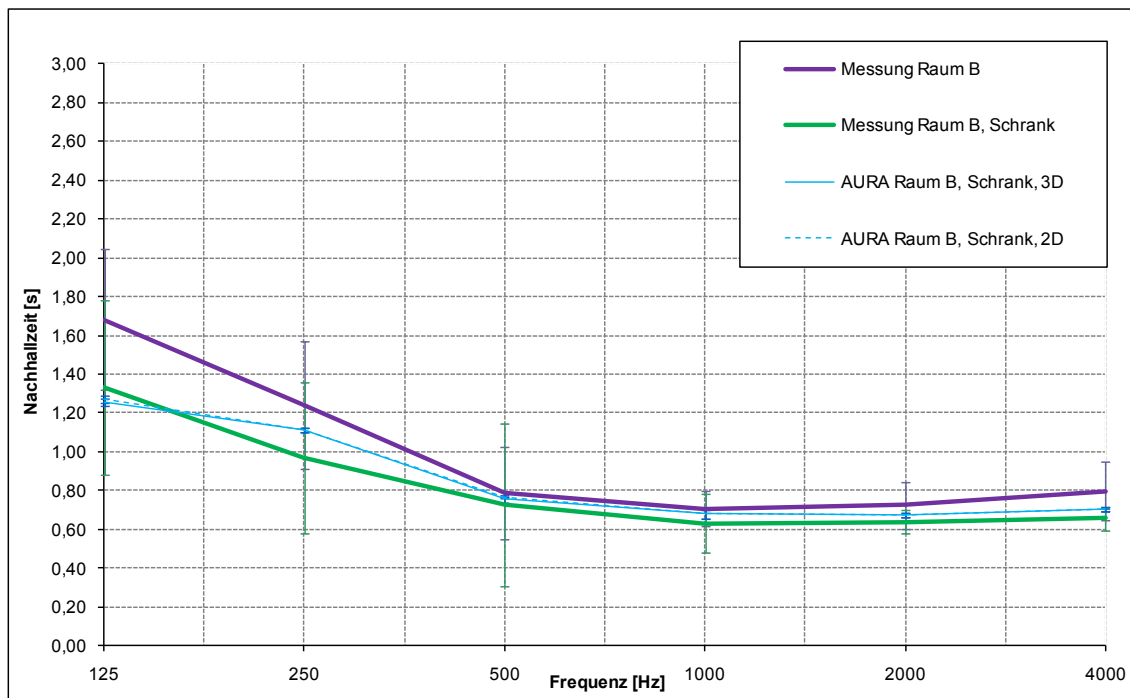


Abbildung 23: Messung und Simulation mit 3D- und 2D-Schrank, Raum B

In der **Abbildung 23** ist zu erkennen, dass wie gewünscht die 2D- auf der 3D-Kurve (**blau** und **blau gestrichelte Kurve**) liegt. Es wird sichtbar, dass die simulierten Nachhallverläufe von der Messung abweichen, obwohl die jeweilige Kalibrierung von Deckensegeln und Schrank mit dem Basismodell **Raum A** als Grundlage durchgeführt wurden. Durch die Kombination von Deckensegel und Schrank treten im Raum andere Wellenphänomene (Verschiebung der Raummoden) auf, welche das reale Schallfeld ändern, jedoch nicht mit EASE AURA simuliert werden können.

4.2.6 Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei verschiedenen Schrankgrößen

Sobald sich die Schrankmaße ändern, verändern sich auch die resultierenden 2D-Absorptionsgrade der Schrankfläche. Die 3D-Absorptionsgrade sollten hingegen, wie bei allen anderen Raumboberflächen, unabhängig von der Schrankgröße beibehalten werden. Diese Festlegung ist jedoch als Vereinfachung anzusehen, da sonst für sämtliche Schrankgrößen die kalibrierten Absorptionsgrade zu ermitteln wären. Theoretisch haben verschiedene Schrankgrößen unterschiedliche Resonanzfrequenzen, diese liegen jedoch bei den gängigen Schrankformen und -größen eng im unteren Frequenzbereich und würden demnach ähnliche Auswirkungen verursachen.

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit der **Formel (4-2)** wird die ursprüngliche Schrankgröße (Höhe = 1,6 m, Breite = 1,2 m, Tiefe = 0,4 m) wie folgt variiert:

- halbe Breite (0,6 m)
- doppelte Breite (2,4 m)
- halbe Höhe (0,8 m)

Die berechneten 2D-Absorptionsgrade der verschiedenen Schrankgrößen sind in der **Anlage F: Tabelle 32-F** zu finden. Bei Gegenüberstellung der Simulationen mit 3D- und 2D-Schrank (**Anlage F: Abbildung 47-F**) sind vergleichbare Kurvenverläufe feststellbar.

Durch die theoretisch hohen 2D-Absorptionsgrade $> 1,00$, für die 2D-Darstellung des Schrankes bei halber Breite und Höhe kommt es jeweils im tieffrequenten Bereich zu leichten Abweichungen.

4.2.7 Überprüfung mit STI-PA

Es wird vermutet, dass aufgrund der Nachhallzeitverkürzung durch den Schrank die Sprachverständlichkeit - in Form des STI-PA (s. **Tabelle 10**) - steigt. Dabei wird angenommen, dass die Werte im **Raum A** geringer als im **Raum B** ausfallen. Die Berechnungsergebnisse mit 2D- und 3D-Schrank sollten dabei eine hohe Übereinstimmung aufweisen und nah an den Messwerten liegen.

Tabelle 10: Gegenüberstellung Messung und Simulation bei 2D- und 3D-Schrank

Situation	HP	STI-PA _{mess}	STI-PA _{3D}	STI-PA _{2D}	STI-PA _{mess} - STI-PA _{3D}	STI-PA _{3D} - STI-PA _{2D}
Raum A, Schrack	HP 1	0,582	0,578	0,580	0,004	-0,002
	HP 2	0,526	0,560	0,560	-0,034	0,000
	HP 3	0,546	0,566	0,566	-0,020	0,000
Raum B, Schrack	HP 1	0,684	0,679	0,679	0,005	0,000
	HP 2	0,638	0,663	0,660	-0,025	0,003
	HP 3	0,636	0,665	0,664	-0,029	0,001

Aus der **Tabelle 10** wird ersichtlich, dass die gemessenen und berechneten STI-PA-Werte gut übereinstimmen. Wie erwartet, weisen die Simulationen mit 2D- und 3D-Schrank eine nahezu identische Sprachverständlichkeit auf und liegen über der des **leeren Raumes A** und **B** (vgl. **Tabelle 7**). Die Vorgabe der maximal zulässigen Abweichung von $\pm 0,05$ wird eingehalten.

4.2.8 Ergebnisse 2D-/3D-Schrankdarstellung

Durch „Übertragung“ von wellentheoretischen Phänomenen (z.B. Resonanz, Beugung) auf die Absorptionsgrade eines dreidimensionalen Schrankes ist es möglich, diesen als Körper wirken zu lassen. Um Modellierungsaufwand zu sparen, kann der Schrank zweidimensional an einer Wand abgebildet werden. Die Übertragung des 3D-Effektes über Streugrade ist nicht möglich. Mit Hilfe einer flächenabhängigen Umrechnung des Absorptionsgrades können identische Nachhallergebnisse mit der 2D-Darstellung erreicht werden.

Der Vergleich der gemessenen und berechneten STI-PA-Werte (3D/2D) zeigt deren weitestgehende Übereinstimmung, wobei die Differenz zwischen Simulation mit 3D und 2D-Möbiliar $< 0,05$ liegt.

Die Umrechnungsformel

$$\alpha_{\text{Schrank},2D} = \frac{\alpha_{\text{Schrank},3D} * S_{\text{Schrank},3D}}{S_{\text{Schrank},2D}}$$

für die 2D-Darstellung von Schränken ist für unterschiedlichste Raumabsorptionen und sämtliche Schrankgrößen anwendbar, jedoch sollte der 2D-Absorptionsgrad aufgrund der EASE-Beschränkung $\leq 1,00$ bleiben, was ein bestimmtes Flächenverhältnis von Schrankseitenteilen zu Schrankfront voraussetzt. Anderenfalls müsste man sich mit einer – aufgrund der resultierenden Abdeckung anderer Flächen – schlecht einschätzbaren Erhöhung der 2D-Schrankfläche behelfen.

Bei den durchgeführten Variationen der Schrankgröße liegen die dokumentierten Abweichungen zwischen den berechneten Nachhallzeiten der Simulationen mit 3D- und 2D-Schränken bei $< 0,10$ s.

4.3 Prognoseberechnung Kombination Schrank/Regal

4.3.1 Regal mit Dämpfung und Streuung durch Ordner

Wenn Schränke geöffnet und mit Ordnern bestückt bzw. Regale vorhanden sind, müsste durch die Ordner eine Senkung der Nachhallzeit über den gesamten Frequenzbereich zu verzeichnen sein, welche durch deren Absorptions- und Streuwirkung hervorgerufen wird.

4.3.2 Messung mit Kombination Schrank/Regal

Um die obige Annahme zu überprüfen, werden Messungen mit Schränken und Regalen durchgeführt. Die verwendete Kombination von Schrank und Regal ist beispielhaft nachfolgend abgebildet.



Abbildung 24: Kombination Schrank/Regal

Zur Dokumentation des Einflusses von einseitiger und verteilter Anordnung der Möbel werden folgende Kombinationen jeweils im **Raum A** und **B** gemessen:

- Schränke/Regale an einer Wand (einseitig, 20 % / 40 % / 60 % / 80 % Wandbelegung)
- Schränke/Regale an mehreren Wänden (verteilt, 2 / 3 / 4 Wände je 20 % Wandbelegung)

Es wurde versucht, Regal- und Schrankanteil zu annähernd gleichen Teilen anzuordnen, was z.B. bei 80 % Wandbelegung besser realisierbar war als bei 20 %

Wandbelegung (s. **Abbildung 24**). Im Mittel umfasst der Regalanteil die Hälfte der Wandbelegung, weil mit verschiedenen Schrank- und Regalgrößen gemessen wurde. Die Messergebnisse im **Raum A** - bei einseitiger Mobiliaranordnung - sind in der folgenden **Abbildung 25** dargestellt. Alle weiteren Messungen im **Raum A** und **B** sind in der **Anlage G: Abbildung 48-G bis Abbildung 50-G** zu finden.

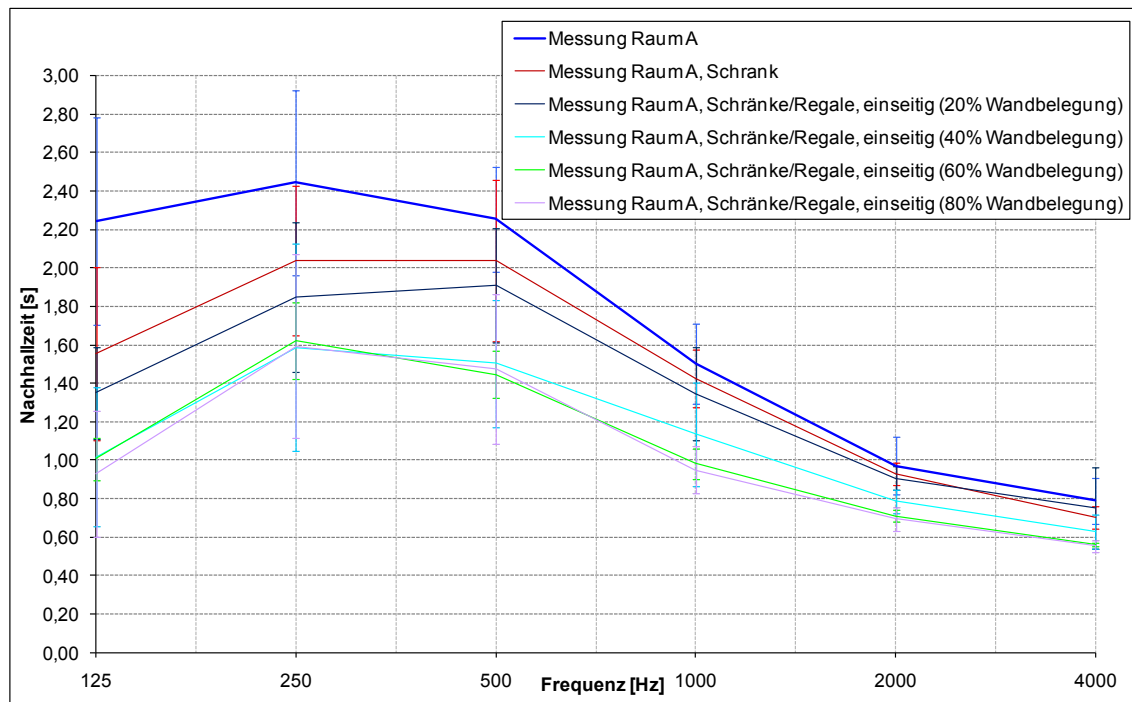


Abbildung 25: Messungen bei einseitiger Belegung mit Schränken/Regalen, Raum A

Wie vermutet, zeigt sich im mittleren und zusätzlich im tiefen Frequenzbereich - im Vergleich zur Messung mit einem Schrank - eine Absenkung der Nachhallzeit aufgrund der Ordnerwirkung. Es ist erkennbar, dass die Kurven bei den Oktavmittenfrequenzen ≤ 500 Hz mit 40 %, 60 % und 80 % Wandbelegung nur geringe Unterschiede aufweisen und annähernd identisch sind. Ein Grund dafür kann die Modenänderung im Raum sein, was nicht simulierbar ist. Es ist abzusehen, dass eine größere Absorptionsfläche - durch die zunehmende Wandbelegung - im Modell die Nachhallzeiten herabsetzen wird, was zu Abweichungen zwischen Messung und Simulation führt.

Im **Raum B** (**Anlage G: Abbildung 48-G**) ist die schrittweise Abnahme der Nachhallzeit bei zunehmender einseitiger Wandbelegung gut erkennbar. Dies trifft ebenso auf die verteilte Anordnung des Mobiliars an mehreren Wänden im **Raum A** und **B** (**Anlage G: Abbildung 49-G und Abbildung 50-G**) zu. In beiden Räumen kann durch die verteilte Mobiliaranordnung eine höhere Senkung der Nachhallzeit erzielt werden als bei einseitiger Anordnung. Dies wird im nachstehenden Absatz näher untersucht.

4.3.3 Einfluss der Anordnung von Einrichtungsgegenständen

Wie mit den Messungen aus **Anlage G** gezeigt wurde, hat die Anordnung des Mobiliars Einfluss auf die resultierenden Nachhallzeiten. Dabei ist im Allg. die verteilte Anordnung des Mobiliars der einseitigen vorzuziehen, da so nicht nur die Diffusität erhöht wird, sondern auch die raumakustisch wirkenden Flächen größer sind. Zudem steigt die Häufigkeit der Absorption aufgrund der kürzeren freien Weglängen und es tritt vermehrt der Kantenbeugungseffekt durch den Wechsel von Wand und Schrank auf.

Im **Raum B** wurde bei verteilter Anordnung (4 Wände zu je 20 % mit Mobiliar verstellt) gezeigt, dass ohne spezielle Tiefenabsorber - allein mit der Schrank- und Regalverteilung - die Nachhallzeit im Bereich um 125 Hz bis 250 Hz deutlich gesenkt werden kann. Diese „Maßnahme“ führt somit bereits zur Einhaltung der anzustrebenden Nachhallzeit für Sprache von 0,54 s (\pm Toleranz) entsprechend **Formel (2-5)** nach DIN 18041 für diesen Raum ($V = 67 \text{ m}^3$). Dieses Beispiel zeigt, dass bei einem verteilten hohen Möblierungsanteil oftmals umfangreiche raumakustische Maßnahmen nicht notwendig sind bzw. Sparpotential vorhanden ist.

4.3.4 Modellierung & Kalibrierung 3D-Schrank/Regal im Raum A

Nachdem der Absorptionsgrad des 3D-Schranks (**Abschnitt 4.2.3**) bereits ermittelt wurde, kann nun das Modell **Raum A, Schrank/Regal, 3D** an die Messwerte über die Absorptionsgrade der Regalfront kalibriert werden. Um einer übermäßigen Fehlerfortpflanzung vorzubeugen, wird die Messung mit der größten belegten Wandfläche an Schränken und Regalen (2,4 x 4,8 x 0,4) m herangezogen. Im Konkreten ist die Wand zu 80 % abgedeckt. Der Regalanteil macht ca. die Hälfte der belegten Fläche aus und ist aus statistischen und realitätsbezogenen Gründen halbvoll mit Ordnern bestückt. Dabei ist zu beachten, dass die Einbauten beidseitig durch die Nachbarwände begrenzt werden. Daraus ergeben sich folgende Absorptionsgrade in EASE:

Tabelle 11: Absorptionsgrade Schrank, Regal

Mobiliar	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Schrank, 3D	0,55	0,23	0,14	0,13	0,24	0,37
Regalfront (halbvoll mit Ordnern)	0,31	0,09	0,23	0,49	0,51	0,56

4.3.5 Modellierung & Kalibrierung 2D-Schrank/Regal im Raum A

Es gilt die These, dass sich die Umrechnung des Absorptionsgrades für die 2D-Darstellung der Kombination Schrank/Regal analog zum einfachen Schrank verhält. Hierbei müssen, ergänzend zu den Absorptionsgraden des Schrankes, die Absorptionsgrade der Regalfront - entsprechend ihres Flächenanteils - mit berücksichtigt werden. Die 2D-Fläche von Schrank und Regal $S_{\text{Schrang/Regal},2D}$ wird einheitlich mit einem frequenzabhängigen 2D-Absorptionsgrad beaufschlagt.

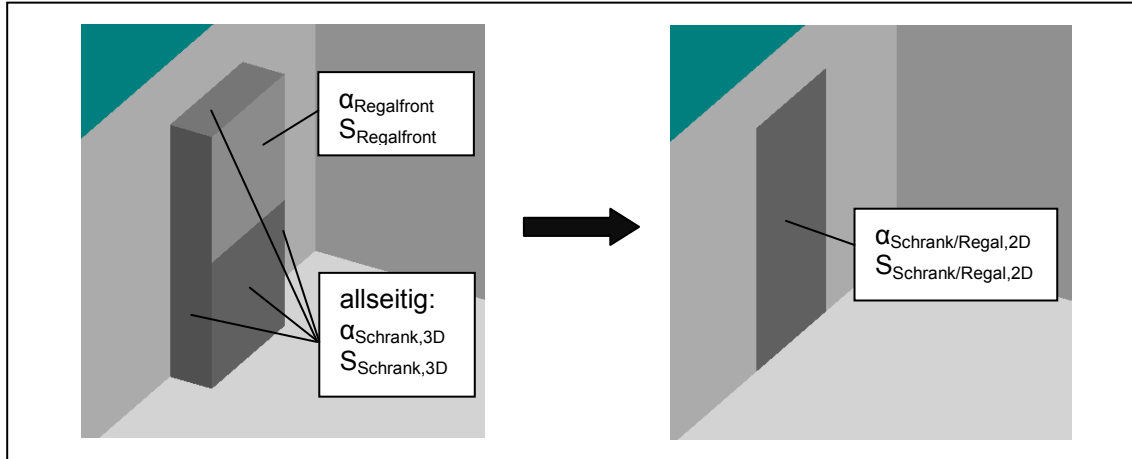


Abbildung 26: Prinzip der 3D-/2D-Modellierung Schrank/Regal

Damit eine Übereinstimmung zwischen 2D- und 3D-Mobiliardarstellung erzielt werden kann, werden über das Flächenverhältnis, in Anlehnung an die **Formel (4-2)**, die frequenzabhängigen 2D-Absorptionsgrade der Kombination Schrank/Regal ermittelt:

$$A_{\text{Schrang/Regal},2D} = A_{\text{Schrang},3D} + A_{\text{Regalfront}} \quad (4-6)$$

$$A_{\text{Schrang/Regal},2D} = \alpha_{\text{Schrang/Regal},2D} * S_{\text{Schrang/Regal},2D} \quad (4-7)$$

$$\alpha_{\text{Schrang/Regal},2D} = \frac{(\alpha_{\text{Schrang},3D} * S_{\text{Schrang},3D}) + (\alpha_{\text{Regalfront}} * S_{\text{Regalfront}})}{S_{\text{Schrang/Regal},2D}} \quad (4-8)$$

Die raumakustisch ungünstige einseitige Anordnung der Schränke und Regale (80 % Wandbelegung) geht mit $S_{\text{Schrang},3D} = 7,68 \text{ m}^2$ und $S_{\text{Regalfront}} = 5,76 \text{ m}^2$ in die Berechnung ein. Daraus ergeben sich für die 2D-Darstellung mit $S_{\text{Schrang/Regal},2D} = 11,52 \text{ m}^2$ (entspricht Mobiliarfront) folgende 2D-Absorptionsgrade:

Tabelle 12: berechnete Absorptionsgrade Kombination Schrank/Regal $\alpha_{\text{Schrank/Regal}, 2D}$

Frequenz [Hz]	$\alpha_{\text{Schrank}, 3D}$	$\alpha_{\text{Regalfront}}$	80 % Wandbelegung $\alpha_{\text{Schrank/Regal}, 2D}$
100	0,60	0,35	0,58
125	0,60	0,32	0,56
160	0,45	0,27	0,44
200	0,30	0,15	0,28
250	0,22	0,05	0,17
315	0,18	0,07	0,16
400	0,16	0,16	0,19
500	0,14	0,22	0,20
630	0,12	0,30	0,23
800	0,12	0,43	0,30
1000	0,12	0,52	0,34
1250	0,14	0,52	0,35
1600	0,19	0,51	0,38
2000	0,24	0,50	0,41
2500	0,29	0,52	0,45
3150	0,34	0,54	0,50
4000	0,38	0,56	0,53
5000	0,38	0,58	0,54

Um die Abweichungen bei einfacher Übertragung der 3D-Absorptionsgrade des kalibrierten Modells mit 3D-Möbiliar auf die 2D-Fläche zu dokumentieren, sind in der **Abbildung 27** die berechneten Nachhallzeiten T_{30} gegenübergestellt.

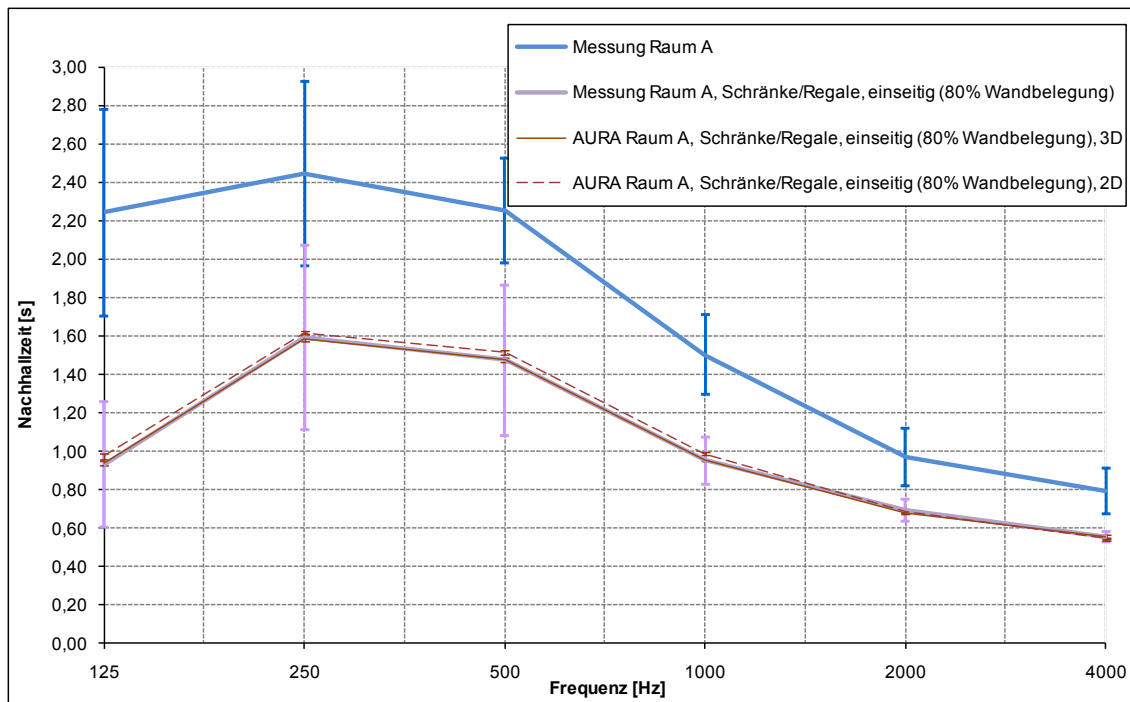


Abbildung 27: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Schrank/Regal, Raum A

Die 3D- und 2D-Nachhallzeitverläufe (*braun* und *braun gestrichelte Kurve*) dieses Modells sind annähernd identisch. Somit ist für diese Mobiliargröße die **Formel (4-8)** anwendbar. Die geringen Unterschiede ergeben sich durch die beidseitige Wandbegrenzung, welche 2D nicht mit berücksichtigt wird.

4.3.6 Anwendung Umrechnungsalgorithmus im Raum B

In der folgenden **Abbildung 28** sind die im **Raum B** (erhöhte Raumabsorption durch die Deckensegel) gemessenen und berechneten Nachhallzeitverläufe bei 80 %-iger Wandbelegung grafisch dargestellt.

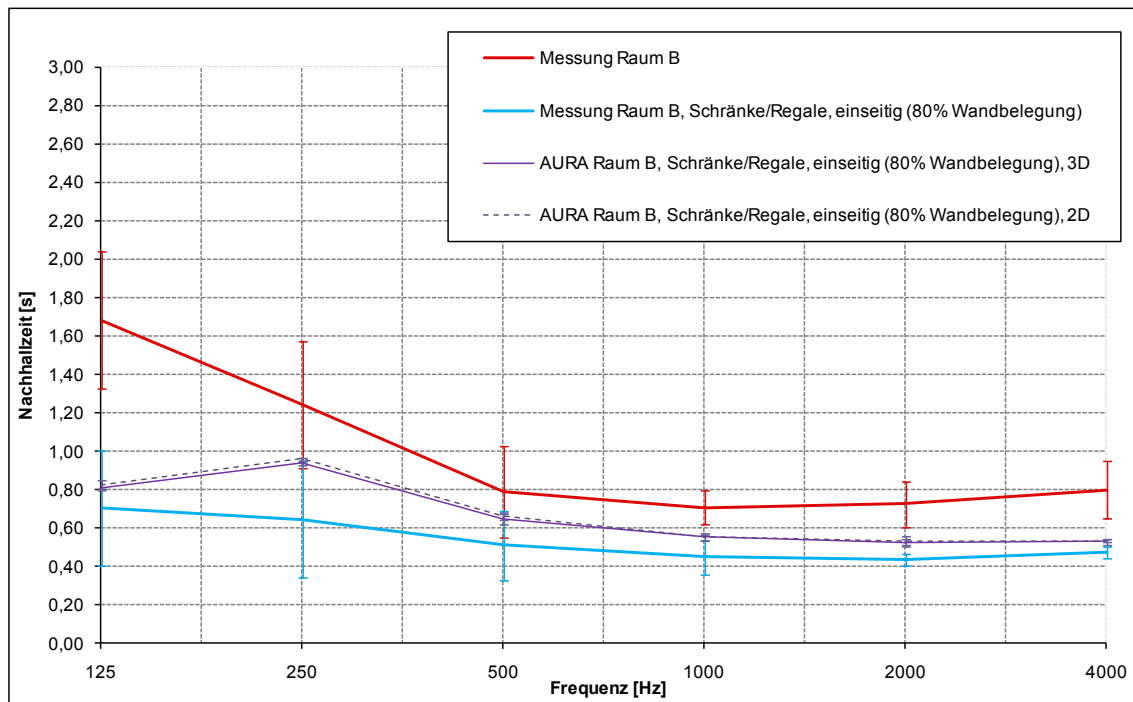


Abbildung 28: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Schrank/Regal, Raum B

Wie in der **Abbildung 28** ersichtlich, gibt es eine gute Übereinstimmung im Kurvenverlauf der simulierten 3D- und 2D-Kurve (*lila* und *lila gestrichelte Kurve*). Somit ist die **Formel (4-8)** auch für andere Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen anwendbar. Hier zeigen sich größere Differenzen zwischen der berechneten und gemessenen Nachhallzeit – schwerpunktmäßig bei 250 Hz - da die Absorptionswerte des Schrankes ohne Deckensegel kalibriert wurden und hier übertragen werden. Durch das Zusammenspiel von Deckensegeln und Schrank verändert sich die räumliche Akustik und die Raummoden (Auswirkungen nicht simulierbar) verschieben sich.

4.3.7 Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei zunehmender Wandbelegung

Weiterführend wird untersucht, ob es zu Abweichungen zwischen den Simulationen mit 3D- und 2D- Mobiliar kommt, wenn die Wandbelegung mit Schränken und Regalen - beispielhaft für die einseitige Wandbelegung - zunimmt. Die mit der **Formel (4-8)** berechneten 2D-Absorptionsgrade für die Simulation (20 %, 40 %, 60 % abgedeckte Wandfläche) sind in der **Anlage G: Tabelle 33-G** zu finden. In der folgenden **Abbildung 29** sind die daraus resultierenden Nachhallzeitverläufe gegenüber gestellt.

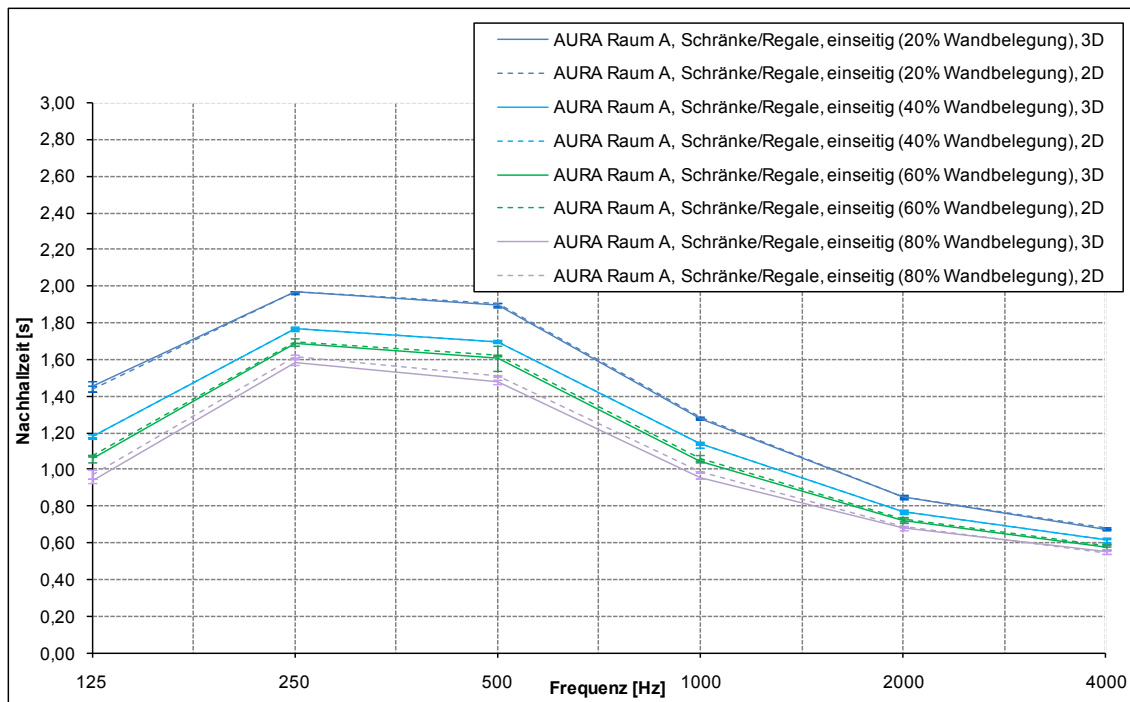


Abbildung 29: Berechnungen mit steigender Wandbelegung Schrank/Regal, Raum A

Die Kurvenverläufe der 2D- und 3D-Simulation stimmen in guter Näherung überein. Vernachlässigbare Abweichungen können durch evtl. angrenzende Nachbarwandflächen an den Möbiliarseiten (**grüne und lila Kurven**) zustande kommen (bei der 3D-Modellierung verdeckte und bei der 2D-Modellierung freiliegende Wandteiflächen). Diese Flächen werden nicht gesondert behandelt, behalten also bei der 2D-Darstellung des Möbils ihre entsprechenden Wandabsorptionsgrade bei und gehen nicht in die Umrechnung ein.

Vergleicht man diese Simulationsergebnisse mit den Messwerten aus der **Abbildung 25**, kommt es – wie erwartet – zu Abweichungen im tieffrequenten Bereich, da die Simulationen auf Vereinfachungen beruhen.

4.3.8 Überprüfung mit STI-PA

Nachfolgend wird untersucht, inwieweit die berechneten und gemessenen STI-PA-Werte übereinstimmen. Mit zunehmender Möblierung sollte im **Raum A** und **B** die Sprachverständlichkeit steigen. Es werden identische Ergebnisse bei der Berechnung mit 3D- und 2D-Möbils erwartet.

Tabelle 13: Vergleich Messung und Simulation STI-PA bei Kombination Schrank/Regal

Situation	HP	STI-PA _{mess}	STI-PA _{3D}	STI-PA _{2D}	STI-PA _{mess} - STI-PA _{3D}	STI-PA _{3D} - STI-PA _{2D}
Raum A, Schränke/Regale, einseitig (20%)	HP 1	0,580	0,590	0,593	-0,010	-0,003
	HP 2	0,536	0,568	0,574	-0,032	-0,006
	HP 3	0,548	0,577	0,579	-0,029	-0,002
Raum A, Schränke/Regale, einseitig (40%)	HP 1	0,630	0,615	0,615	0,015	0,000
	HP 2	0,566	0,594	0,593	-0,028	0,001
	HP 3	0,602	0,602	0,598	0,000	0,004
Raum A, Schränke/Regale, einseitig (60%)	HP 1	0,652	0,631	0,628	0,021	0,003
	HP 2	0,570	0,604	0,605	-0,034	-0,001
	HP 3	0,608	0,617	0,616	-0,009	0,001
Raum A, Schränke/Regale, einseitig (80%)	HP 1	0,652	0,644	0,638	0,008	0,006
	HP 2	0,572	0,618	0,616	-0,046	0,002
	HP 3	0,622	0,627	0,626	-0,005	0,001
Raum A, Schränke/Regale, verteilt (2 Wände je 20%)	HP 1	0,620	0,621	0,621	-0,001	0,000
	HP 2	0,556	0,597	0,599	-0,041	-0,002
	HP 3	0,574	0,604	0,608	-0,030	-0,004
Raum A, Schränke/Regale, verteilt (3 Wände je 20%)	HP 1	0,648	0,649	0,647	-0,001	0,002
	HP 2	0,558	0,622	0,619	-0,064	0,003
	HP 3	0,622	0,634	0,629	-0,012	0,005
Raum A, Schränke/Regale, verteilt (4 Wände je 20%)	HP 1	0,690	0,670	0,665	0,020	0,005
	HP 2	0,606	0,642	0,640	-0,036	0,002
	HP 3	0,644	0,652	0,645	-0,008	0,007
Raum B, Schränke/Regale, einseitig (20%)	HP 1	0,728	0,695	0,691	0,033	0,004
	HP 2	0,648	0,670	0,668	-0,022	0,002
	HP 3	0,658	0,677	0,674	-0,019	0,003
Raum B, Schränke/Regale, einseitig (40%)	HP 1	0,736	0,718	0,716	0,018	0,002
	HP 2	0,678	0,691	0,691	-0,013	0,000
	HP 3	0,682	0,699	0,696	-0,017	0,003
Raum B, Schränke/Regale, einseitig (60%)	HP 1	0,720	0,704	0,702	0,016	0,002
	HP 2	0,670	0,685	0,685	-0,015	0,000
	HP 3	0,666	0,686	0,690	-0,020	-0,004
Raum B, Schränke/Regale, einseitig (80%)	HP 1	0,752	0,728	0,729	0,024	-0,001
	HP 2	0,708	0,702	0,707	0,006	-0,005
	HP 3	0,716	0,706	0,713	0,010	-0,007
Raum B, Schränke/Regale, verteilt (2 Wände je 20%)	HP 1	0,728	0,714	0,711	0,014	0,003
	HP 2	0,680	0,685	0,684	-0,005	0,001
	HP 3	0,678	0,696	0,693	-0,018	0,003

Fortsetzung Tabelle 13: Vergleich Messung und Simulation STI-PA bei Kombination Schrank/Regal

Situation	HP	STI-PA _{mess}	STI-PA _{3D}	STI-PA _{2D}	STI-PA _{mess} – STI-PA _{3D}	STI-PA _{3D} – STI-PA _{2D}
Raum B, Schränke/Regale, verteilt (3 Wände je 20%)	HP 1	0,758	0,733	0,728	0,025	0,005
	HP 2	0,680	0,699	0,698	-0,019	0,001
	HP 3	0,688	0,714	0,710	-0,026	0,004
Raum B, Schränke/Regale, verteilt (4 Wände je 20%)	HP 1	0,764	0,743	0,741	0,021	0,002
	HP 2	0,688	0,713	0,708	-0,025	0,005
	HP 3	0,696	0,723	0,721	-0,027	0,002

Wie aus der **Tabelle 13** ersichtlich, wird das Kriterium „Differenz zwischen Simulation mit 3D- und 2D-Möbiliar max. $\pm 0,05$ “ erfüllt. Die simulierten STI-PA-Werte bei 3D-Darstellung des Möbiliars sind mit den Messwerten vergleichbar und weichen ebenfalls nicht mehr als $\pm 0,05$ voneinander ab. Des Weiteren können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Mit steigendem Möblierungsanteil nimmt die Sprachverständlichkeit zu.
- Es liegt eine sehr genaue Übereinstimmung zwischen der Simulation mit 3D- und 2D-Möbiliar vor.
- Im **Raum B** werden aufgrund der raumakustischen Maßnahme höhere Werte erzielt.

4.3.9 Ergebnisse 2D-/3D-Schrank- und Regaldarstellung

Die erweiterte Umrechnungsformel für die 2D-Darstellung von Kombinationen aus Schrank und Regal mit

$$\alpha_{\text{Schrank/Regal},2D} = \frac{(\alpha_{\text{Schrank},3D} * S_{\text{Schrank},3D}) + (\alpha_{\text{Regalfront}} * S_{\text{Regalfront}})}{S_{\text{Schrank/Regal},2D}}$$

ist für unterschiedlichste Raumabsorptionen und zunehmender Wandbelegung (sowohl einseitig als auch verteilt) anwendbar, jedoch sollte der 2D-Absorptionsgrad aufgrund der EASE-Beschränkung $\leq 1,00$ bleiben. Tendenziell sinkt mit zunehmendem Möbiliaranteil die Nachhallzeit bei Simulation und Messung, jedoch kann es zu größeren Abweichungen kommen. Die Berechnung des STI-PA hingegen kann relativ genau nachgebildet werden. Die dokumentierten Differenzen zwischen den berechneten Nachhallzeiten der Simulationen mit 3D- und 2D-Schränken liegen bei $< 0,10$ s und die STI-PA-Differenz bei $< 0,05$.

4.4 Prognoseberechnung Tisch

4.4.1 Tisch als Plattenschwinger

Das raumakustische Verhalten von Tischen müsste – im Vergleich zu Schränken – annähernd analoge Eigenschaften aufweisen. Im Konkreten bedeutet dies, dass signifikante raumakustische Wirkungen vorrangig auf die Biegeeigenschwingungen und deren Oberwellen der Tischplatte (Sperrholz) im unteren Frequenzbereich zurückzuführen sind.

4.4.2 Messungen mit Tischen

Zur messtechnischen Überprüfung der theoretischen Überlegungen werden die **Räume A** und **B** mit einer verschiedenen Anzahl von Tischen bestückt und die Nachhallzeit gemessen. Die Tische mit den Abmaßen 1,50 m x 0,75 m (Länge x Breite) haben eine Höhe von 0,70 m (s. **Abbildung 30**).



Abbildung 30: Tisch

Die gemessenen Nachhallzeiten im **Raum A** sind in der **Abbildung 31** und im **Raum B** in der **Anlage H: Abbildung 51-H** grafisch dargestellt.

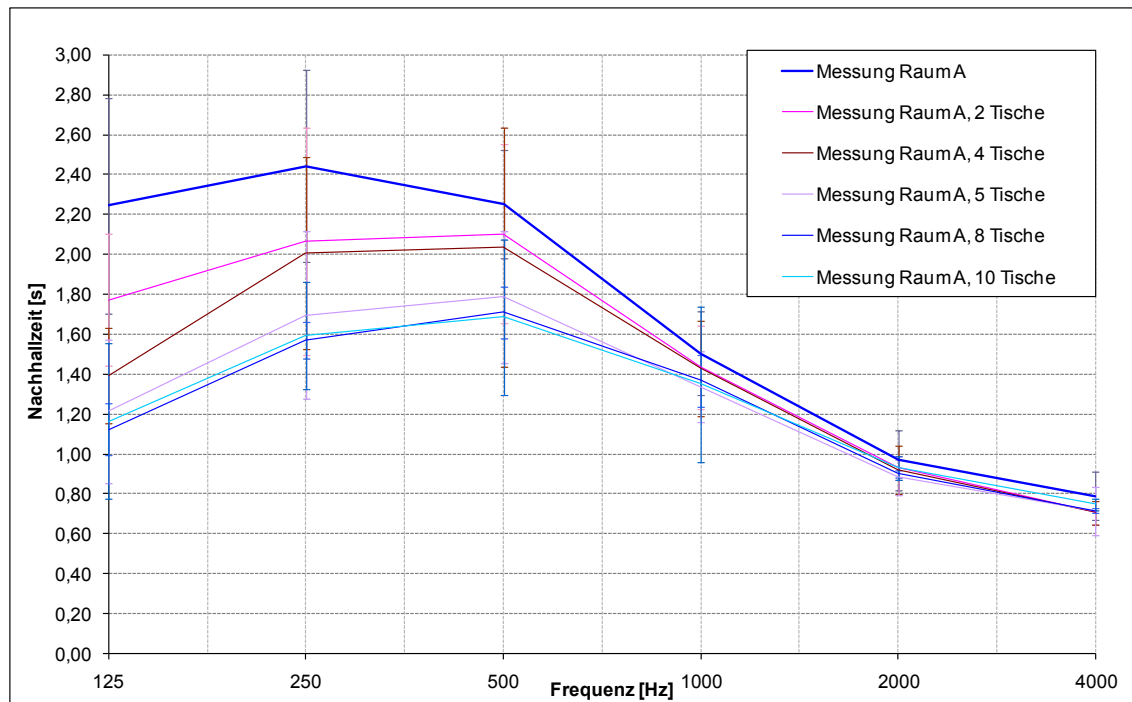


Abbildung 31: Messungen mit Tischen, Raum A

Wie der **Abbildung 31** (und **Abbildung 51-H**) zu entnehmen ist, ergibt sich die größte Wirkung (Nachhallzeitsenkung) im unteren Frequenzbereich ($f \leq 500$ Hz), was den theoretischen Überlegungen entspricht.

Die gemessenen Werte für die Oktavmittenfrequenz von 125 Hz im **Raum A** bei Verdopplung der Tischanzahl werden den Berechnungsergebnissen nach **Sabine Formel (2-3)** in der **Tabelle 14** gegenübergestellt.

Tabelle 14: Vergleich Messung und Berechnung bei Verdopplung der Tischanzahl

Raum A	T_{mess} [s] bei 125 Hz	T_{Sabine} [s] bei 125 Hz	A [m ²] bei 125 Hz
leer	2,24	2,34	4,68
2 Tische	1,77	1,93	5,67
4 Tische	1,39	1,64	6,66
8 Tische	1,12	1,26	8,64

Die **Tabelle 14** zeigt, dass durch 8 Tische die äquivalente Schallabsorptionsfläche - im Vergleich zum leeren Raum - fast verdoppelt wird. Dies bewirkt bei Messung und Berechnung eine annähernde Halbierung der Nachhallzeit und entspricht somit den theoretischen Grundlagen. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung könnten auf die Streuwirkung der Tische und/oder die Änderung der Raummoden zurück zu führen sein, welche bei den Messungen zu niedrigeren Nachhallzeiten führen.

4.4.3 Modellierung & Kalibrierung 3D-Tische im Raum A

Bei der 3D-Modellierung von Tischen werden diese als schwebende Platten - mit beidseitiger Vergabe der Absorptionsgrade und ohne Plattendicke - in das Raummodell integriert. Um einer übermäßigen Fehlerfortpflanzung vorzubeugen, wird das Modell mit 10 Tischen kalibriert. Das Modell **Raum A, 10 Tische, 3D** wird anschließend über die Absorptionsgrade der 10 Tische - entsprechend der Messwerte - kalibriert. In der nachstehenden **Tabelle 15** sind die iterativ ermittelten Absorptionsgrade aufgeführt.

Tabelle 15: Absorptionsgrade Tisch

Möbiliar	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Tisch, 3D	0,21	0,12	0,09	0,07	0,10	0,11

4.4.4 Modellierung & Kalibrierung 2D-Tische im Raum A

4.4.4.1 Prinzip der 2D-Tischdarstellung

Für die Umsetzung der 2D-Darstellung von Tischen wird zum Ansatz gebracht, dass die 2D-Tischfläche der 3D-Tischoberseite (s. **Abbildung 32**) entspricht.

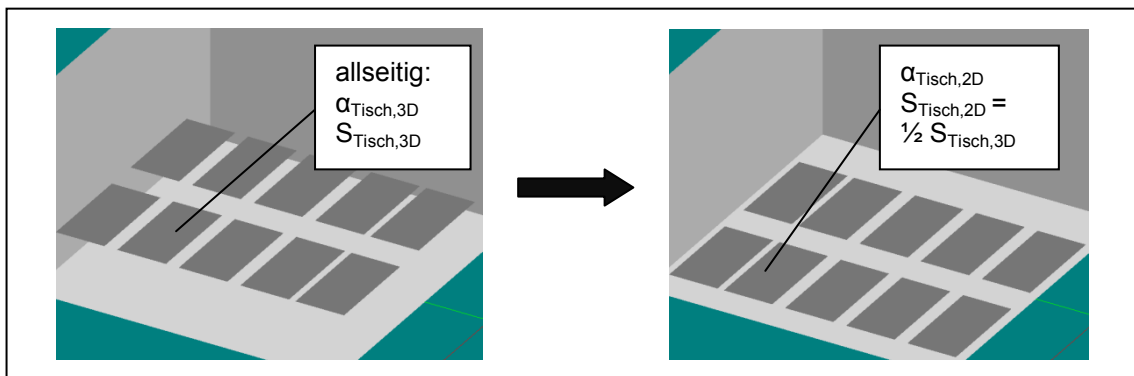


Abbildung 32: Prinzip der 3D-/2D-Modellierung Tisch

Die Tische werden zweidimensional in die Bodenfläche (Teppich) integriert. Das erklärte Ziel ist die Anpassung der Nachhallzeitkurve des Modells **Raum A, 10 Tische, 2D** über $\alpha_{Tisch,2D}$ an die simulierten Nachhallzeitverläufe des Modells **Raum A, 10 Tische, 3D**.

4.4.4.2 These

In Anlehnung an die vorangegangenen Betrachtungen soll die äquivalente Schallabsorptionsfläche des 3D-Tisches und des abgeschatteten Bodens (direkt unter Tisch) gleich der des 2D-Tisches sein.

$$A_{Tisch,2D} = A_{Tisch,3D} + A_{Boden} \quad (4-9)$$

$$A_{Tisch,3D} = S_{Tisch,3D} * \alpha_{Tisch,3D} \quad (4-10)$$

$$A_{Tisch,3D} = S_{Tischoberseite,3D} * \alpha_{Tisch,3D} + S_{Tischunterseite,3D} * \alpha_{Tisch,3D} \quad (4-11)$$

$$A_{Boden} = S_{Boden} * \alpha_{Boden} \quad (4-12)$$

$$A_{Tisch,2D} = S_{Tisch,2D} * \alpha_{Tisch,2D} \quad (4-13)$$

Der Umrechnungsalgorithmus für den 2D-Absorptionsgrad des Tisches setzt sich aus den Absorptionsanteilen des Bodens (Teppich) und des 3D-Tisches zusammen. Wobei zu beachten ist, dass die 2D-Tischfläche der Hälfte der gesamten 3D-Tischfläche entspricht. Als Vereinfachung wird die Stärke der Tischplatte vernachlässigt.

$$S_{Tisch,3D} = S_{Tischoberseite,3D} + S_{Tischunterseite,3D} \quad (4-14)$$

$$S_{Tisch,3D} = 2 * S_{Tisch,2D} = 2 * S_{Boden} \quad (4-15)$$

Im ideal diffusen Schallfeld (homogene Teilchenverteilung), würde die 2D-Tischfläche einen 2D-Absorptionsgrad erhalten, der sich aus der Summe von Tisch- und Bodenabsorption - entsprechend des Flächenanteils - zusammensetzt:


$$\alpha_{Tisch,2D} = \alpha_{Tischoberseite,3D} + \alpha_{Tischunterseite,3D} + \alpha_{Boden} \quad (4-16)$$

$$\alpha_{Tisch,3D} = \alpha_{Tischoberseite,3D} = \alpha_{Tischunterseite,3D} \quad (4-17)$$

$$\alpha_{Tisch,2D} = 2 * \alpha_{Tisch,3D} + \alpha_{Boden} \quad (4-18)$$

Aufgrund der Abschattung der Tischunterseite und der Bodenfläche werden dort weniger Schallteilchen absorbiert. Deshalb werden die jeweiligen Absorptionsgrade mit den **Faktoren** $m_{Tischunterseite,3D}$ und n_{Boden} – beide zwischen 0 und 1 (0 = volle Abschattung; 1 = keine Abschattung) durch die Behinderung der Teilchen-zugänglichkeit - versehen. Es ist möglich, dass nicht nur der Bodenbereich direkt unter dem Tisch abgeschattet wird, sondern die Abschattung weitläufiger den Boden beeinflusst. Jedoch muss die dadurch entstandene verminderte Absorptionswirkung des Bodens auf die definierte 2D-Tischfläche am Boden übertragen werden. Es wird vermutet, dass die Abschattung der Tischunterseite und des betreffenden Bodens annähernd gleich groß ausfällt. Volle Absorptionswirkung wird dagegen der Tischoberseite zugesprochen, welche auch der Größe der resultierenden 2D-Tischfläche entspricht und deshalb mit 1 in die Berechnung eingeht. Es soll folgende These gelten:

$$\alpha_{Tisch,2D} = (1 + m_{Tischunterseite,3D}) * \alpha_{Tisch,3D} + n_{Boden} * \alpha_{Boden} \quad (4-19)$$



Tischoberseite

Tischunterseite

$$A_{Tisch,2D} = S_{Tisch,2D} * [(1 + m_{Tischunterseite,3D}) * \alpha_{Tisch,3D} + n_{Boden} * \alpha_{Boden}] \quad (4-20)$$

Es ist unbekannt, mit welcher Größenordnung $m_{Tischunterseite,3D}$ und n_{Boden} in die Berechnung eingehen. Da vermutet wird, dass ein optimales Verhältnis dieser Faktoren zu den gleichen Ergebnissen der Nachhallzeit führt, wie bei der 3D-Modellierung der Tische, soll das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate nach Gauß angewandt werden, um dieses Verhältnis zu finden.

4.4.4.3 Thesenkontrolle

Die geringere Absorptionswirkung der Tischunterseite und des abgeschirmten Bodens sollten sich aufgrund der erschwerten Strahlzugänglichkeit bei den gesuchten Faktoren widerspiegeln. Im Folgenden werden die Nachhallzeitverläufe bei jeweilig eingehenden Anteilen $m_{Tischunterseite,3D}$ und n_{Boden} - entsprechend obiger These - simuliert. Anschließend wird die Differenz aus den 3D- und 2D-Nachhallzeiten quadriert. Durch Summation über die Oktaven werden die **kleinsten Fehlerquadrate nach Gauß** ermittelt.

$$|\Delta T|^2 = \sum_f |\bar{T}_{f,3D} - \bar{T}_{f,2D}|^2 \quad (4-21)$$

Das Minimum wird in den Bereichen gesucht, wo einerseits der Tisch mit hohen Anteilen $m_{Tischunterseite,3D}$ in die Berechnung einfließt und andererseits der Boden mit hohen Anteilen n_{Boden} berücksichtigt wird bzw. wo beide Anteile im Mittelfeld annähernd gleich eingehen. Es hat sich in Probeuntersuchungen abgezeichnet, dass die Bereiche mit beidseitig sehr niedrigen/hohen Anteilen von der Betrachtung ausgeschlossen werden können. Das Variationsraster der Faktoren wurde entsprechend der nachfolgenden **Tabelle 16** für ausreichend genau befunden.

Tabelle 16: kleinste Fehlerquadrate nach Gauß für 2D-Darstellung Tisch

	$m_{\text{Tischunterseite,3D}}$											
	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00
n_{Boden}	$ \Delta T ^2 [10^{-3} \text{ s}^2]$											
0,40	zu kleine Anteile						33,82	27,04	21,80	17,47	13,73	11,02
0,45							23,08	16,87	12,82	10,96	8,62	6,19
0,50							16,45	13,35	7,60	6,96	4,19	2,61
0,55							13,77	8,36	5,17	3,60	3,34	3,14
0,60	47,57	35,12	28,44	23,88	15,73	10,17	8,29	5,63	2,89	2,26	2,48	2,70
0,65	38,53	28,62	24,56	18,94	11,13	9,32	4,84	3,56	2,47	2,21	2,33	4,95
0,70	31,73	24,37	18,72	14,23	11,17	6,80	4,02	4,03	2,20	3,03	4,65	6,25
0,75	26,59	20,28	14,35	11,28	8,56	5,37	5,05	4,01	4,16	5,73	7,71	10,58
0,80	25,97	16,98	15,84	10,22	7,73	6,61	5,24	6,98	6,78	8,86	10,37	14,55
0,85	22,39	17,95	13,32	10,31	10,17	8,34	8,55	zu große Anteile				
0,90	22,49	17,59	14,75	12,31	11,42	10,83	11,54					
0,95	20,19	20,23	16,01	15,14	12,46	16,18	17,92					
1,00	24,22	20,61	17,71	18,01	16,70	17,19	20,83					

Der **Tabelle 16** ist zu entnehmen, dass das kleinste Gaußsche Fehlerquadrat von $2,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^2$ bei $m_{\text{Tischunterseite,3D}} = 0,88$ und $n_{\text{Boden}} = 0,70$ vorliegt. Daraus könnte geschlussfolgert werden, dass von den 100 % möglichen Schallteilchen, die den Bodenbereich direkt unter den Tischen erreichen könnten, „nur“ 70 % dies tun. Die Tischunterseite hingegen, erreichen 88 % der möglichen Schallteilchen - was vorerst unwahrscheinlich klingt, da die Abschattung von Boden und Tischunterseite im selben Größenbereich liegen müsste. In der nachstehenden **Abbildung 33** wird der ermittelte Minumbereich (**dunkelrot**) grafisch dargestellt.

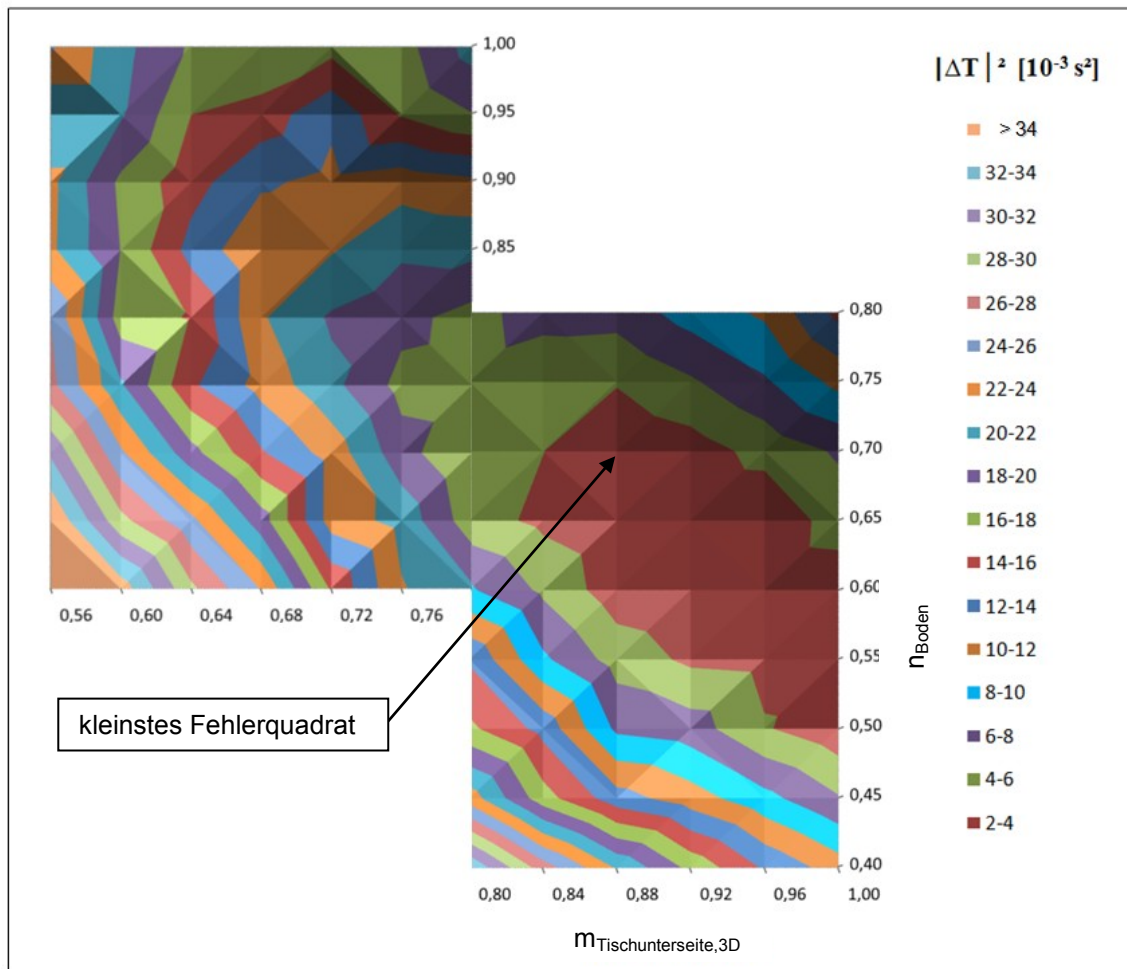


Abbildung 33: kleinste Fehlerquadrate nach Gauß für 2D-Darstellung Tisch

In dem dunkelroten Bereich befinden sich mehrere Minima. Demnach könnte bei wiederholter Simulation aufgrund der Standardabweichungen bei der Nachhallzeitberechnung das kleinste Minimum von dem hier ermittelten kleinsten Fehlerquadrat abweichen. Durch umfangreiche statistische Betrachtungen kann das absolute Minimum in zukünftigen Untersuchungen noch näher bestimmt werden. Aufgrund einer hinreichenden Genauigkeit (s. **Abbildung 34**) wird – im Rahmen dieser Arbeit - davon abgesehen.

Für unsere These ergibt sich bei dem gefundenen Minimum mit $m_{Tischunterseite,3D} = 0,88$ und $n_{Boden} = 0,70$ folgender Zusammenhang:

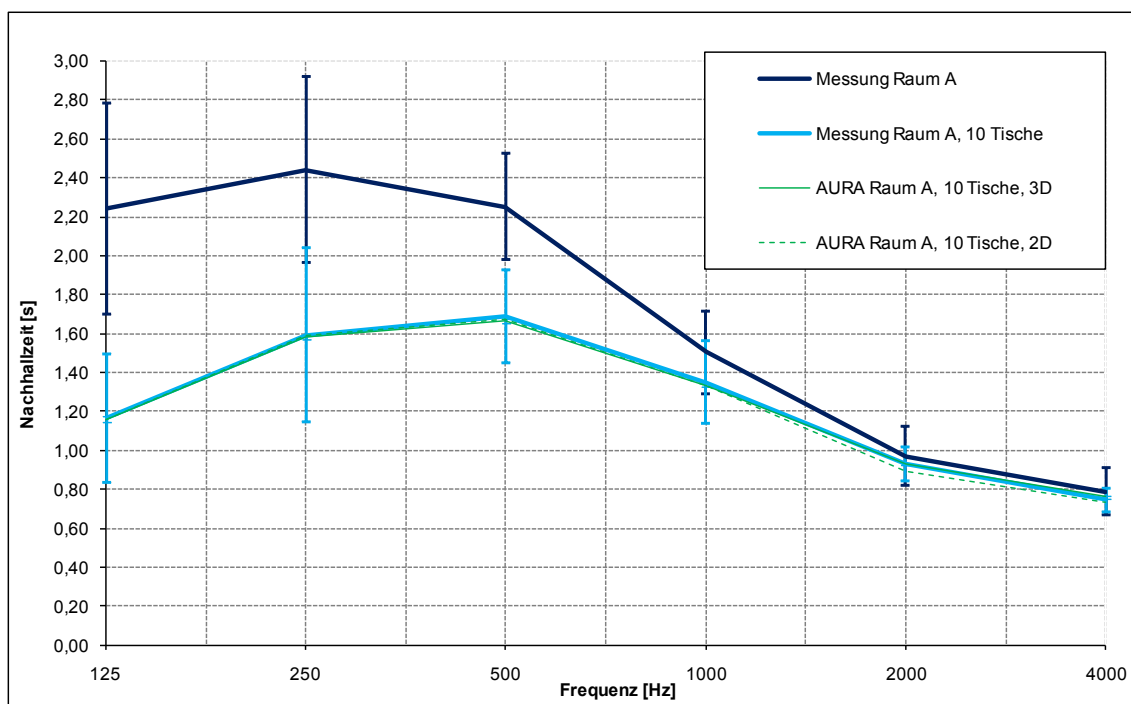
$$\alpha_{Tisch,2D} = (1 + 0,88) * \alpha_{Tisch,3D} + 0,70 * \alpha_{Boden} \quad (4-22)$$

Die sich daraus ergebenden Absorptionsgrade der 2D-Tische $\alpha_{Tisch,2D}$ am Boden sind in der folgenden **Tabelle 17** aufgelistet.

Tabelle 17: berechnete Absorptionsgrade Tisch $\alpha_{\text{Tisch},2\text{D}}$

Frequenz [Hz]	$\alpha_{\text{Tisch},3\text{D}}$	α_{Boden}	$\alpha_{\text{Tisch},2\text{D}}$
100	0,24	0,03	0,47
125	0,22	0,03	0,43
160	0,18	0,03	0,36
200	0,14	0,04	0,29
250	0,11	0,06	0,25
315	0,10	0,06	0,23
400	0,09	0,07	0,22
500	0,09	0,08	0,23
630	0,08	0,11	0,23
800	0,07	0,14	0,23
1000	0,06	0,17	0,23
1250	0,07	0,21	0,28
1600	0,09	0,26	0,35
2000	0,10	0,29	0,39
2500	0,10	0,30	0,40
3150	0,11	0,32	0,43
4000	0,11	0,32	0,43
5000	0,11	0,32	0,43

Der daraus resultierende Kurvenverlauf für die 2D-Darstellung der Tische wird in der nachfolgenden **Abbildung 34** den Messwerten gegenübergestellt.

**Abbildung 34:** Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Tischen, Raum A

Der Nachhallzeitverlauf mit den 2D-Tischen (**grün gestrichelte Kurve**) und den 2D-Absorptionsgraden $\alpha_{\text{Tisch},2D}$ ist identisch mit der Kurve der 3D-Tische (**grüne Kurve**).

Aus dem Umrechnungsalgorithmus **Formel (4-22)** könnte abgeleitet werden, dass 12 % (100 % - 88 %) weniger Schallteilchen durch die Abschattung die Tischunterseiten erreichen und 30 % (100 % - 0,70 %) weniger den betreffenden Bodenbereich unter den Tischen. Es liegt jedoch die Vermutung näher, dass Tischunterseite und Boden gleichermaßen abgeschattet werden. Dazu wird im Folgenden die Strahlverteilung im Modell sichtbar gemacht. Es müsste im simulierten Schallfeld eine verminderte Strahlendichte unter der Tischplatte erkennbar sein (s. **Abbildung 35**).

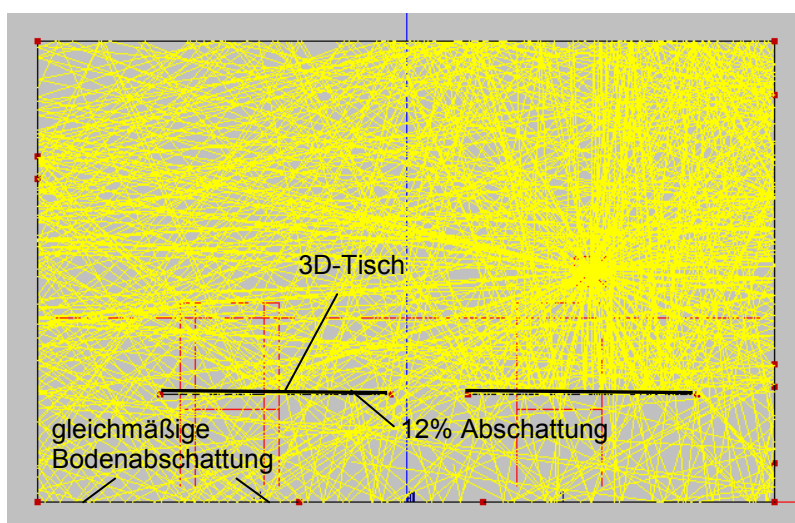


Abbildung 35: EASE Strahlverfolgung im Raum A mit 10 Tischen (Seitenansicht)

Wie erwartet, zeigt sich ein leichter Unterschied in der Strahlendichte über und unter den Tischen. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass der gesamte Bodenbereich durch die Tische abgeschattet wird. **Demnach schatten die Tischplatten einen größeren Bereich ab als den Boden direkt unter den Tischen.**

Die 10 Tische ergeben eine Fläche von ca. 11 m² und entsprechen damit der Hälfte des gesamten Bodens von ca. 22 m². Wenn die 30 % verminderte Wirksamkeit der betrachteten Bodenfläche auf die gesamte Bodenfläche umgerechnet wird, ergibt sich eine Abschattung von ca. 15 %, welche im Größenbereich der Abschattung der Tischunterseiten von 12 % liegt. Die Abweichung der Abschattung könnte sich durch das gewählte Raster zur Bestimmung der kleinsten Fehlerquadrate ergeben haben.

Somit schatten die 3D-Tische in EASE eine **doppelt** so große Bodenfläche ab.

Dieser Effekt wird in **Abbildung 36** bei den 2D-Tischen am Boden entsprechend **Formel (4-22)** mit 30 % verminderter Bodenabsorption berücksichtigt.

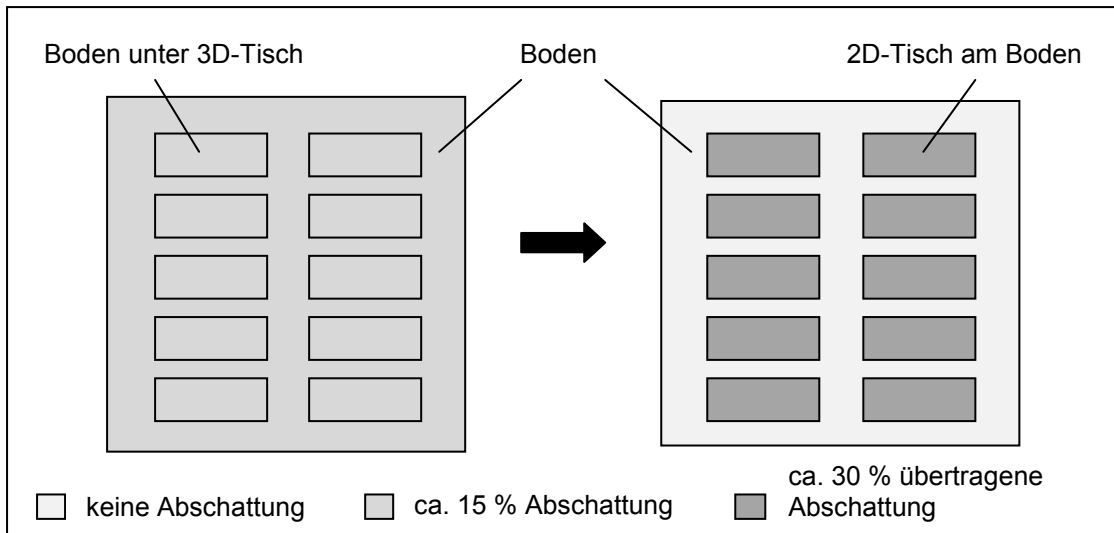


Abbildung 36: Bodenabschattung durch Tische (Draufsicht)

4.4.5 Anwendung Umrechnungsalgorithmus im Raum B

Eine erhöhte äquivalente Schallabsorptionsfläche durch die Deckensegel ergibt - bei entsprechender Umrechnung, wie für den **Raum A** beschrieben, folgenden Verlauf der Nachhallzeit mit 2D-Tischen:

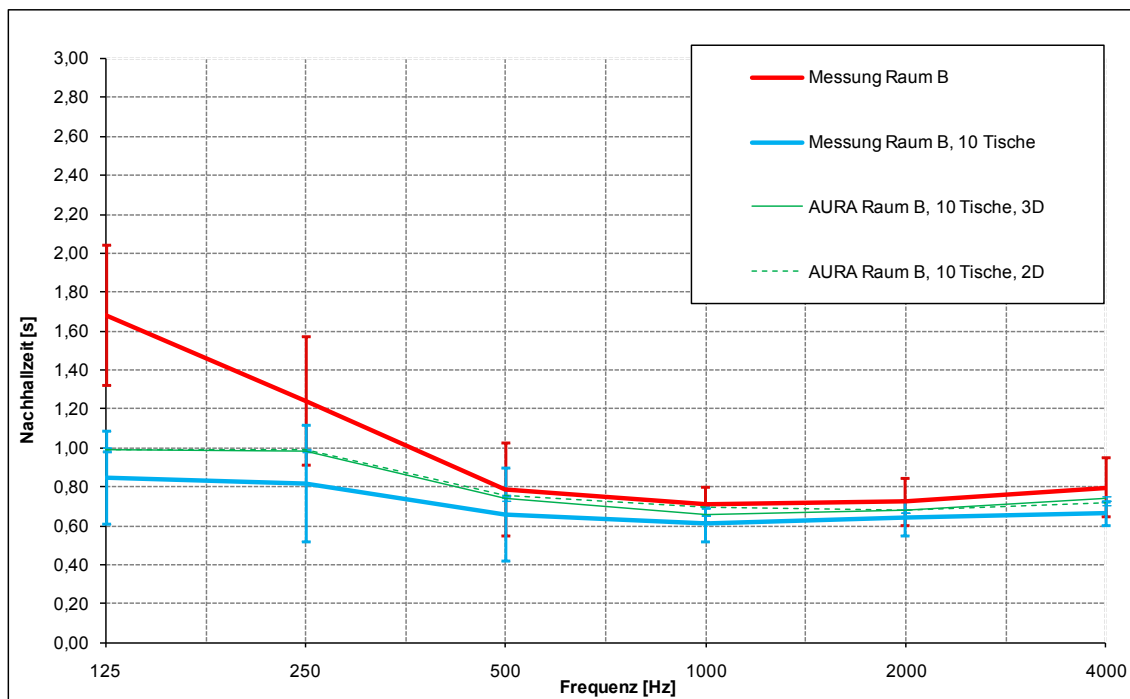


Abbildung 37: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Tischen, Raum B

In der **Abbildung 37** verläuft in guter Näherung die 2D- auf der 3D-Kurve. Auch hier zeigt sich die Abweichung der Messkurve von den berechneten Nachhallzeiten mit 2D-

und 3D-Möbiliar, die sich aus den bereits erwähnten Gründen (s. **Abschnitt 4.2.5**) ergeben kann.

4.4.6 Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei Variation möglicher Einflussfaktoren

Die erarbeitete **Formel (4-22)** basiert auf der Abschätzung von Schallteilchen in der Modellsimulation. Es soll geprüft werden, inwieweit dieser Effekt von der Tischanzahl, Tischhöhe/-größe (realistische Variation), Tischposition und Lautsprecherhöhe, sowie von der Raumgröße bzw. -komplexität abhängig ist. Weil die Faktoren m und n zum Teil aus den verwendeten Absorptionsgraden resultieren, ist deren Anwendbarkeit bei anderen Absorptionseigenschaften von Tisch und Boden zu untersuchen.

4.4.6.1 Tischanzahl

Es wird die Anzahl der Tische (2 / 4 / 5 / 8 / 10) im **Raum A** variiert. Entsprechend der **Abbildung 52-H** in **Anlage H** ergeben sich identische Kurvenverläufe der Berechnungen mit 2D- und 3D-Tischen in Abhängigkeit der jeweiligen Anzahl. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Formel gut für eine unterschiedliche Anzahl von Tischen anwendbar ist. Allerdings weichen die berechneten Nachhallzeiten durch die reale Beeinflussung der Raummoden von den Messwerten (vgl. **Abbildung 31**) ab.

4.4.6.2 Tischgröße, -höhe und -position

Durch die Variation der Tischgröße soll die Abhängigkeit der 2D-Darstellung von dieser Größe beleuchtet werden, wobei folgende Variationen untersucht werden:

- Standardtischgröße (1,50 m x 0,75 m) → 10 Tische
- halbe Tischlänge (0,75 m x 0,75 m) → 10 Tische
- doppelte Tischbreite (1,50 m x 1,50 m) → 5 Tische

Die berechneten Nachhallzeitverläufe sind in der **Anlage H: Abbildung 53-H** ausgewiesen. Jeweilig gleichfarbige 3D- und 2D-Nachhallverläufe liegen übereinander. Der Umrechnungsalgorithmus verhält sich demnach unabhängig von den Abmaßen des Tisches. Die Berechnungsergebnisse mit den Standardtischgrößen und mit der doppelten Tischbreite sind identisch, weil sie trotz unterschiedlicher Tischanzahl die gleichen Tischflächen aufweisen. Die Nachhallzeiten bei halber Tischlänge sind länger, da weniger Absorptionsfläche zur Verfügung steht.

Inwieweit die Variation der Tischhöhe - in realistischer Größenordnung – die Ergebnisse beeinflusst, soll wie folgt überprüft werden:

- Tischhöhe 0,60 m
- Standardtischhöhe 0,70 m
- Tischhöhe 0,80 m

Im **Anhang H: Abbildung 54-H** werden die Berechnungsergebnisse ausgewiesen. Alle Kurven mit 3D-Tischen sind annähernd identisch. Demnach spielt die Tischhöhe in diesem Variationsbereich keine Rolle. Die Nachhallzeitverläufe mit den 2D-Tischen sind exakt gleich und deshalb nur einmal abgebildet, da die Tischhöhe nicht in den Umrechnungsalgorithmus involviert ist.

Weiterhin wird der Einfluss der Tischposition im Raum überprüft. Die Tische werden, statt im Raum verteilt, an den Wänden positioniert. Ob die veränderte Abschattung sichtbare Auswirkungen auf das Ergebnis der Nachhallzeit hat, zeigt die **Anlage H: Abbildung 55-H**.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass trotz veränderter Position der Tische, es zu einer ähnlichen Abschattung der Bodenfläche kommt, welche zwar anders gelagert sein kann, aber im Resultat ein identisches Ergebnis erzielt.

4.4.6.3 Lautsprecherhöhe

Bei veränderter Lautsprecherhöhe könnte es zu einer veränderten Bestrahlung der Tischunterseite und des Bodens kommen. Deshalb erfolgt die Betrachtung bei Variation der Lautsprecherhöhe (s. **Anlage H: Abbildung 56-H**).

- Lautsprecherhöhe 1,00 m
- Standard-Lautsprecherhöhe 1,50 m
- Lautsprecherhöhe 2,00 m

Die Veränderung der Lautsprecherhöhe bewirkt - laut **Abbildung 56-H** - keinen abweichenden Verlauf der Nachhallzeit im Vergleich zur Standardhöhe von 1,50 m. Somit ist der Umrechnungsalgorithmus nicht durch die hier betrachteten Lautsprecherhöhen determiniert.

4.4.6.4 Andere Tisch- und Bodenabsorption

Weil Tische je nach Material und Aufbau in der Realität unterschiedlich wirken können und auch eine große Variationsbreite an Bodenmaterialien (Teppich, Parkett, Beton

usw.) existiert, wird separat mit beliebigen Absorptionsgraden (realistische Variationsbreite von 0,01 bis 0,40) für Tische und Boden simuliert. Die nach **Formel (4-22)** ermittelten Schallabsorptionsgrade für die 2D-Tischflächen sind in der **Tabelle 34-H** und **Tabelle 35-H** zu finden. In der **Anlage H: Abbildung 57-H** und **Abbildung 58-H** sind die daraus resultierenden Simulationsergebnisse dargestellt.

Die berechneten Nachhallzeitverläufe der zusammengehörigen 2D- und 3D-Kurven weisen nur leichte Abweichungen auf. Aus dieser Beobachtung lässt sich ableiten, dass der Umrechnungsalgorithmus für die 2D-Darstellung der Tische auch für andere Absorptionsgrade - in guter Näherung - anwendbar ist und ähnliche Verläufe bei 3D- und 2D-Modellierung der Tische liefert.

Geringe Abweichungen sind auf die Verschiebung des Minimums nach Gauß – durch abweichende Absorption von Tisch und Boden - und somit auf die Korrekturfaktoren m und n zurück zu führen.

Die erarbeitete **Formel (4-22)** liefert, wie eben gezeigt, auch bei anderer Tisch- und Bodenabsorption annähernd gleiche Nachhallzeiten (max. Abweichung < 0,10 s) und kann somit bei gängigen Tisch- und Bodenmaterialien angewendet werden.

4.4.6.5 Andere Raumform und -größe

Schlussendlich wird der Einfluss der Raumform bzw. der Raumgröße auf die Darstellungsweise der Tische geprüft, weil bei abweichender Primärstruktur des Raumes das Schallfeld und somit die Teilchenausbreitung sich verändert und den Abschattungseffekt beeinflussen könnte. Die berechneten Ergebnisse für folgende Raumvarianten:

- Raum A
- doppelte Raumgröße
- vierfache Raumgröße
- komplexe Raumform

sind in der **Anlage H: Abbildung 59-H** ausgewiesen. In dieser Abbildung sind alle gleichfarbigen Kurven (3D, 2D) identisch. Dies zeigt, dass der Umrechnungsalgorithmus für verschiedene Raumformen und -größen anwendbar ist.

4.4.7 Überprüfung mit STI-PA

In der nachfolgenden **Tabelle 18** werden die berechneten STI-PA-Werte im **Raum A** und **B** den Messwerten gegenüber gestellt.

Tabelle 18: Vergleich Messung und Simulation STI-PA bei Tischen

Situation	HP	STI-PA _{mess}	STI-PA _{3D}	STI-PA _{2D}	STI-PA _{mess} - STI-PA _{3D}	STI-PA _{3D} - STI-PA _{2D}
Raum A, 2 Tische	HP 1	0,574	0,564	0,566	0,010	-0,002
	HP 2	0,542	0,551	0,548	-0,009	0,003
	HP 3	0,538	0,554	0,555	-0,016	-0,001
Raum A, 4 Tische	HP 1	0,578	0,578	0,574	0,000	0,004
	HP 2	0,522	0,555	0,572	-0,033	-0,017
	HP 3	0,550	0,563	0,572	-0,013	-0,009
Raum A, 5 Tische	HP 1	0,582	0,583	0,572	-0,001	0,011
	HP 2	0,518	0,560	0,559	-0,042	0,001
	HP 3	0,528	0,567	0,564	-0,039	0,003
Raum A, 8 Tische	HP 1	0,582	0,590	0,583	-0,008	0,007
	HP 2	0,532	0,570	0,564	-0,038	0,006
	HP 3	0,544	0,577	0,573	-0,033	0,004
Raum A, 10 Tische	HP 1	0,578	0,592	0,589	-0,014	0,003
	HP 2	0,538	0,573	0,574	-0,035	-0,001
	HP 3	0,550	0,581	0,581	-0,031	0,000
Raum B, 2 Tische	HP 1	0,672	0,673	0,673	-0,001	0,000
	HP 2	0,642	0,653	0,664	-0,011	-0,011
	HP 3	0,648	0,660	0,672	-0,012	-0,012
Raum B, 4 Tische	HP 1	0,694	0,686	0,676	0,008	0,010
	HP 2	0,628	0,656	0,658	-0,028	-0,002
	HP 3	0,634	0,662	0,659	-0,028	0,003
Raum B, 5 Tische	HP 1	0,686	0,684	0,675	0,002	0,009
	HP 2	0,632	0,657	0,655	-0,025	0,002
	HP 3	0,642	0,663	0,661	-0,021	0,002
Raum B, 8 Tische	HP 1	0,704	0,690	0,678	0,014	0,012
	HP 2	0,630	0,664	0,660	-0,034	0,004
	HP 3	0,660	0,670	0,667	-0,010	0,003
Raum B, 10 Tische	HP 1	0,704	0,692	0,678	0,012	0,014
	HP 2	0,628	0,666	0,662	-0,038	0,004
	HP 3	0,658	0,674	0,669	-0,016	0,005

Die **Tabelle 18** zeigt, dass die berechneten STI-PA-Werte in guter Näherung mit den Messwerten vergleichbar sind, wobei sich die schon im **Abschnitt 4.1.4** festgestellte Tendenz bei den einzelnen Hörerpositionen zeigt. Wie erwartet, weisen die Simulationen mit 2D- und 3D-Tischen eine annähernd identische Sprachverständlichkeit auf. Die Vorgabe der maximal zulässigen Abweichung von $\leq 0,05$ wird eingehalten.

4.4.8 Ergebnisse 2D-/3D-Tischdarstellung

Die 2D-Darstellung von Tischen kann nur vergleichbare äquivalente Schallabsorptionsgrade zur 3D-Darstellung erreichen, wenn die Abschattung von Tischunterseite und Boden durch die 3D-Tischplatte bei der Umrechnung berücksichtigt wird. Die 2D-Tischfläche bzw. die eingehende Bodenfläche unter dem Tisch entspricht dabei der Fläche der Tischoberseite. Der Umrechnungsalgorithmus

$$\alpha_{Tisch,2D} = (1 + 0,88) * \alpha_{Tisch,3D} + 0,70 * \alpha_{Boden}$$

liefert gute Ergebnisse bei der untersuchten Variationsbreite der Tischanzahl, -größe, -höhe, und -position sowie der Lautsprecherhöhe. Ebenso zeigt die Modifikation der Absorptionsgrade von Tisch und Boden sowie der Raumform und -größe, dass die **Formel (4-22)** ihre Gültigkeit unter den untersuchten Bedingungen behält.

Bei gängigen Tischarten und den genannten Randbedingungen treten Abweichungen der simulierten Nachhallzeit (3D-/2D-Tische) von $< 0,10$ s auf.

4.5 Prognoseberechnung Stuhl

4.5.1 Stuhl als poröser Absorber

Bei porösem Mobiliar, wie gepolsterten Stühlen, dominieren die strukturabhängigen Absorptionseigenschaften. Weiterhin kann es durch die Form des Stuhles zu Streueffekten kommen. Deshalb müsste das raumakustische Verhalten von gepolsterten, unbesetzten Stühlen vorwiegend im mittel- und hochfrequenten Bereich Wirkung zeigen.

Hinzu kommt, dass die Stühle einen Abstand zum Boden aufweisen, wodurch auch tiefe Frequenzen gedämpft werden könnten. Der in der Untersuchung verwendete Stuhl-Typ ist exemplarisch in **Abbildung 38** dargestellt.



Abbildung 38: gepolsterter, unbesetzter Stuhl

4.5.2 Messungen mit Stühlen

Um die Annahmen zu bestätigen, werden Messungen im **Raum A (Abbildung 39)** und **B (Anlage I: Abbildung 60-I)** mit einer verschiedenen Anzahl an Stühlen durchgeführt. Mit zunehmender Stuhlanzahl wird eine Senkung der Nachhallzeit über den gesamten Frequenzverlauf erwartet.

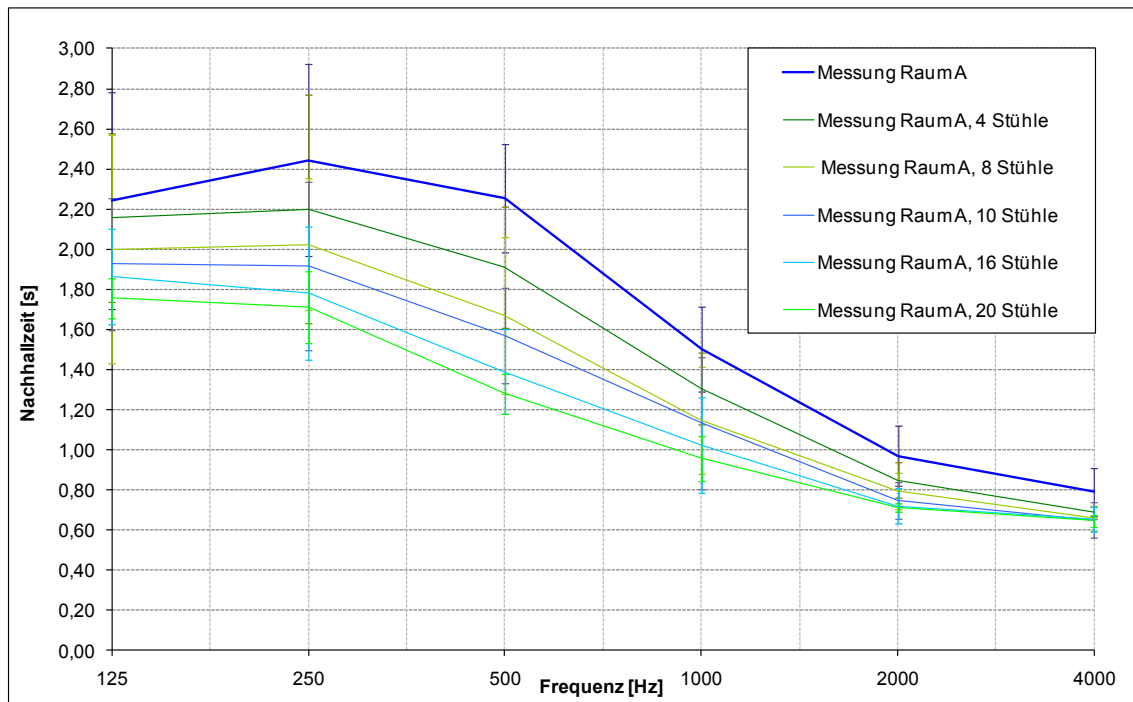


Abbildung 39: Messungen mit Stühlen, Raum A

Die Nachhallzeitverläufe in **Abbildung 39** zeigen, dass eine Senkung der Nachhallzeit mit zunehmender Stuhlanzahl schwerpunktmäßig im mittel- und tieffrequenten Bereich eintritt. Bei hohen Frequenzen bewirken die Stühle ebenfalls Nachhallzeitverkürzungen, welche aber aufgrund der schon vorher geringen Nachhallzeit nicht so hoch ausfallen.

Mit höherer äquivalenter Schallabsorptionsfläche (**Raum B**) müssten geringere Nachhallzeitveränderungen mit der gleichen Möblierung hervorgerufen werden. Bei dem **Raum A** ohne raumakustische Maßnahme – in Form von Deckensegeln – konnte mit 20 Stühlen eine Nachhallzeitsenkung bei 500 Hz bis zu 0,90 s erzielt werden. Im **Raum B** (**Abbildung 60-I**) mit Deckensegeln und 20 Stühlen waren es nur 0,20 s.

4.5.3 Modellierung & Kalibrierung 3D-Stühle im Raum A

Der 3D-Stuhl, mit einer Sitzhöhe von 0,50 m, wird aus 2 senkrecht zueinanderstehenden Flächen modelliert. Die Sitzfläche hat eine Größe von 0,40 m x 0,40 m und die Lehne beträgt ebenfalls 0,40 m x 0,40 m. Damit hat die 3D-Stuhlfläche – inklusive den jeweiligen Rückseiten – eine Gesamtgröße von 0,80 m x 0,80 m hat.

Das Modell **Raum A, 10 Stühle, 3D** wird entsprechend der Messwerte über das Stuhlmaterial iterativ kalibriert. Die Stuhlflächen – einschließlich der Stuhlunterseite – bekommen vereinfacht die gleichen Absorptionsgrade (s. **Tabelle 19**).

Tabelle 19: Absorptionsgrade Stuhl

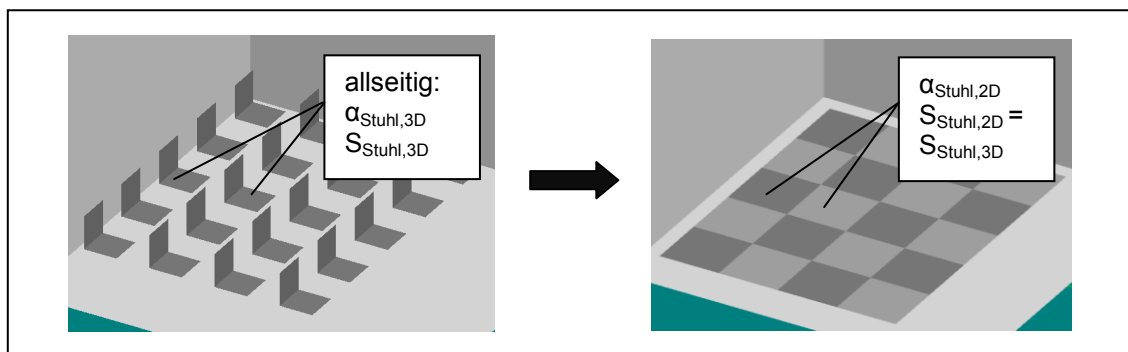
Mobiliar	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Stuhl (unbesetzt), 3D	0,10	0,15	0,31	0,38	0,46	0,36

4.5.4 Modellierung & Kalibrierung 2D-Stühle im Raum A

4.5.4.1 Prinzip der 2D-Stuhldarstellung

Das Prinzip zur Umsetzung der 2D-Darstellung von Stühlen wird nachfolgend beschrieben und in **Abbildung 40** bildlich umgesetzt. Es wird – im Gegensatz zum Schrank bzw. Tisch – nicht die Front bzw. Draufsicht als 2D-Fläche verwendet, sondern $S_{\text{Stuhl},2D}$ entspricht der Fläche $S_{\text{Stuhl},3D}$ und S_{Boden} pro Stuhl, weil der Platz für den Beinbereich und der Seitenabstand mit berücksichtigt werden. Durch diese Festlegung wird zudem versucht, die 2D-Absorptionsgrade $\leq 1,00$ zu halten.

Der pro 3D-Stuhl betrachtete Bodenbereich beträgt 0,80 m x 0,80 m, ebenso die 2D-Stuhlfläche mit 0,80 m x 0,80 m (entspricht dem 4-fachen der Sitzfläche).

**Abbildung 40:** Prinzip der 2D-/3D-Modellierung Stuhl

Die Stühle werden zweidimensional in die Bodenfläche (Teppich) integriert. Das spätere Ziel ist die Anpassung der Nachhallzeitkurve des Modells **Raum A, 20 Stühle, 2D** über $\alpha_{\text{Stuhl},2D}$ an die simulierten Nachhallzeitverläufe des Modells **Raum A, 20 Stühle, 3D**.

4.5.4.2 These

Die äquivalente Schallabsorptionsfläche des 2D-Stuhles soll sich wie folgt ergeben:

$$A_{\text{Stuhl},2D} = A_{\text{Stuhl},3D} + A_{\text{Boden}} \quad (4-23)$$

$$A_{\text{Boden}} = S_{\text{Boden}} * \alpha_{\text{Boden}} \quad (4-24)$$

$$A_{\text{Stuhl},2D} = S_{\text{Stuhl},2D} * \alpha_{\text{Stuhl},2D} \quad (4-25)$$

$$A_{Stuhl,3D} = S_{Stuhl,3D} * \alpha_{Stuhl,3D} \quad (4-26)$$

Die verschiedenen Stuhlflächen sind nachstehend festgelegt:

$$S_{Stuhl,2D} = S_{Stuhl,3D} = S_{Boden} \quad (4-27)$$

$$S_{Stuhl,3D} = \frac{1}{4} S_{Stuhl,3D} + \frac{3}{4} S_{Stuhl,3D} \quad (4-28)$$

\downarrow \downarrow
 abgeschattete Stuhlfläche nicht abgeschattete Stuhlfläche
 (Stuhlunterseite) (Sitzfläche, Lehne vorn und hinten)

$$\frac{S_{abgeschattete\ Stuhlfläche,3D}}{S_{nicht\ abgeschattete\ Stuhlfläche,3D}} = \frac{1}{3} \quad (4-29)$$

Der Stuhl schirmt – analog zum Tisch (s. **Abbildung 35**) – die doppelte Bodenfläche als den Bodenbereich direkt unter dem Stuhl ab. Dieser Abschattungseffekt wird jedoch später dem Bodenbereich direkt unter dem Stuhl angerechnet.

$$S_{Boden} = \frac{1}{4} * S_{Boden} + \frac{3}{4} * S_{Boden} \quad (4-30)$$

\downarrow \downarrow
 Boden direkt unter Stuhl betrachteter Bodenbereich nicht direkt unter Stuhl

Im ideal diffusen Schallfeld (überall optimale Strahlenverteilung), würde die 2D-Stuhlfläche einen 2D-Absorptionsgrad erhalten, der sich aus der Summe von Stuhl- und Bodenabsorption entsprechend des Flächenanteils zusammensetzt:

$$\alpha_{Stuhl,2D} = \alpha_{Stuhl,3D} + \alpha_{Boden} \quad (4-31)$$

$$\alpha_{Stuhl,3D} = \frac{1}{4} \alpha_{Stuhlunterseite,3D} + \frac{1}{4} \alpha_{Sitzfl.,3D} + \frac{1}{4} \alpha_{Lehne\ vorn,3D} + \frac{1}{4} \alpha_{Lehne\ hinten,3D} \quad (4-32)$$

$$\alpha_{Boden} = \frac{1}{4} \alpha_{Boden\ direkt\ unter\ Stuhl} + \frac{3}{4} \alpha_{Boden\ nicht\ direkt\ unter\ Stuhl} \quad (4-33)$$

Unter Berücksichtigung der Abschattung von Boden und Stuhlunterseite werden die **Faktoren x** und **y** vergeben: Folgende These soll gelten.

$$\alpha_{Stuhl,2D} = x_{Stuhl,3D} * \alpha_{Stuhl,3D} + y_{Boden} * \alpha_{Boden} \quad (4-34)$$

Die Kontrolle der These für die Stühle könnte nun, wie bei den Tischen durchgeführt werden. Weil aber eine Analogie bei der Abschattung angenommen wird, soll dieselbe verminderte Absorptionswirkung angesetzt werden. Das kleinste Gaußsche Fehlerquadrat wäre aufgrund der abweichenden Absorptionsgrade des Stuhls im Gegensatz zum Tisch etwas anders gelagert, aber dieser Einflussfaktor (s. **Abschnitt 4.4.6.4**) wurde schon beim Tisch untersucht und für marginal befunden. Die verminderte Absorptionswirkung der abgeschattete Stuhlunterseite wird mit m berücksichtigt und der Boden direkt unter dem Stuhl mit n .

- $m_{\text{Stuhlunterseite},3D} = 0,88$
- $n_{\text{Boden}} = 0,70$

Somit ergibt sich für x und y unter Berücksichtigung der jeweilig betroffenen Flächenanteile:

$$x_{\text{Stuhl},3D} = \frac{1}{4} * m_{\text{Stuhlunterseite}} + \frac{3}{4} * 1 = 0,970 \quad (4-35)$$

\downarrow \downarrow
 Anteil Stuhlunterseite Anteil Sitzfläche, Lehne vorn und hinten

$$y_{\text{Boden}} = \frac{1}{4} * n_{\text{Boden}} + \frac{3}{4} * 1 = 0,925 \quad (4-36)$$

\downarrow \downarrow
 Bodenanteil direkt unter Stuhl Bodenanteil nicht direkt unter Stuhl

Der resultierende Umrechnungsalgorithmus für die 2D-Absorptionsgrade der Stühle lautet:

$\alpha_{\text{Stuhl},2D} = 0,970 * \alpha_{\text{Stuhl},3D} + 0,925 * \alpha_{\text{Boden}}$

(4-37)

Die berechneten Absorptionsgrade für den 2D-Stuhl sind in der **Tabelle 20** zu finden.

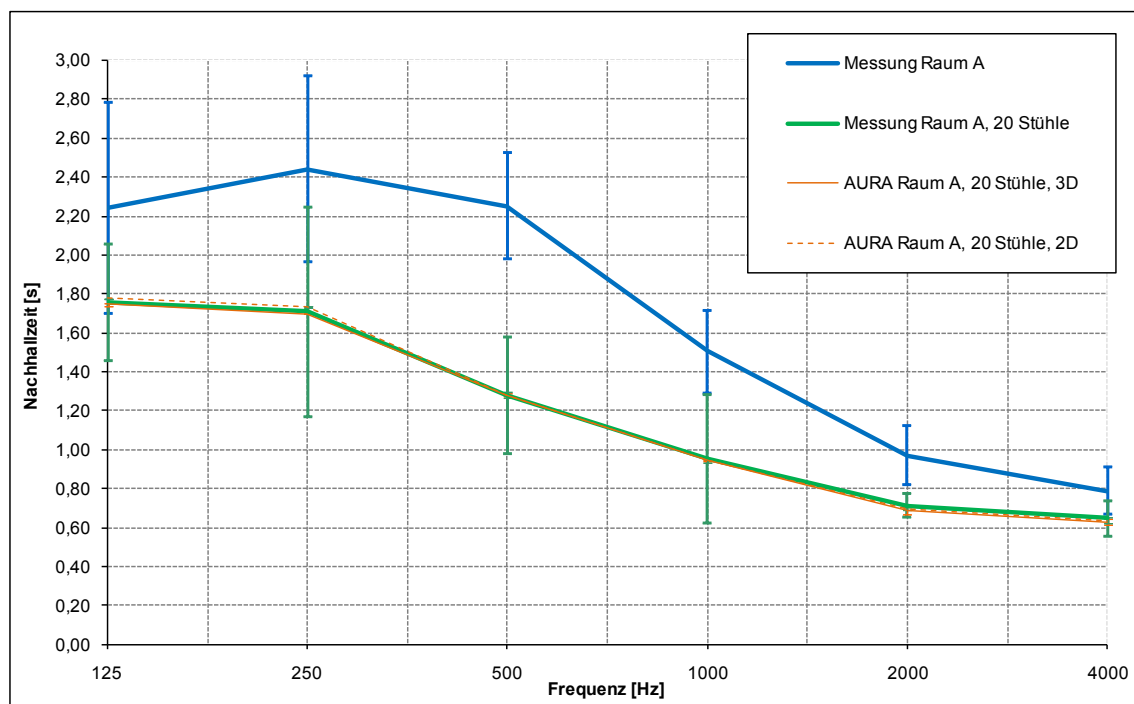
Tabelle 20: berechnete Absorptionsgrade Stuhl $\alpha_{\text{Stuhl},2D}$

Frequenz [Hz]	$\alpha_{\text{Stuhl},3D}$	α_{Boden}	$\alpha_{\text{Stuhl},2D}$
100	0,08	0,03	0,11
125	0,10	0,03	0,12
160	0,12	0,03	0,14
200	0,13	0,04	0,16
250	0,14	0,06	0,19
315	0,18	0,06	0,23

Fortsetzung Tabelle 20: berechnete Absorptionsgrade Stuhl $\alpha_{\text{Stuhl},2\text{D}}$

Frequenz [Hz]	$\alpha_{\text{Stuhl},3\text{D}}$	α_{Boden}	$\alpha_{\text{Stuhl},2\text{D}}$
400	0,26	0,07	0,32
500	0,32	0,08	0,38
630	0,35	0,11	0,44
800	0,36	0,14	0,48
1000	0,38	0,17	0,53
1250	0,41	0,21	0,59
1600	0,45	0,26	0,68
2000	0,50	0,29	0,75
2500	0,43	0,30	0,69
3150	0,38	0,32	0,66
4000	0,36	0,32	0,65
5000	0,34	0,32	0,63

In der folgenden **Abbildung 41** sind die daraus berechneten Nachhallzeitverläufe dargestellt.

**Abbildung 41:** Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Stühlen, Raum A

Wie in der **Abbildung 41** zu erkennen ist, sind die Verläufe bei 3D- und 2D-Stuhldarstellung identisch. Das bedeutet, dass für die verwendeten Absorptionsgrade der Umrechnungsalgorithmus anwendbar ist.

4.5.5 Anwendung Umrechnungsalgorithmus im Raum B

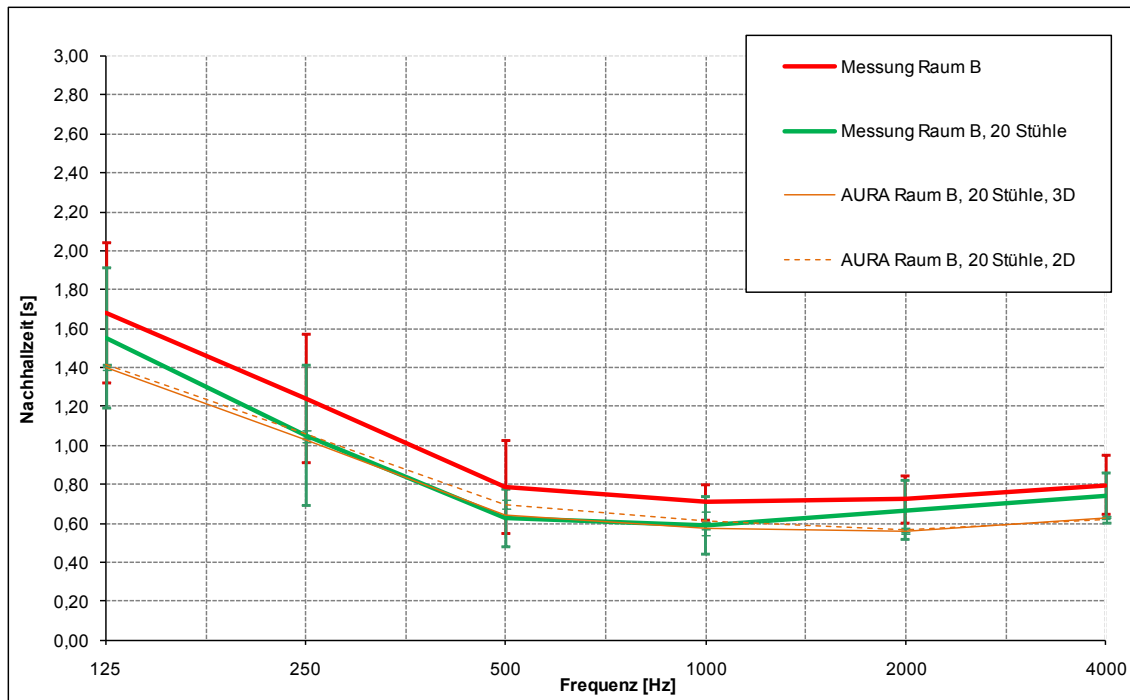


Abbildung 42: Messung und Berechnung mit 3D- und 2D-Stühlen, Raum B

Der fast identische Verlauf der **orange** und **orange gestrichelten Kurve** in der **Abbildung 42** bestätigt, dass die **Formel (4-37)** auch für höhere Raumabsorptionen in guter Näherung gilt.

4.5.6 Anwendung Umrechnungsalgorithmus bei Variation möglicher Einflussfaktoren

Aufgrund der Tatsache, dass der Umrechnungsalgorithmus **Formel (4-37)** für die 2D-Darstellung der Stühle auf der **Formel (4-22)** für die 2D-Darstellung der Tische basiert, wird eine identische Abhängigkeit von den - in **Abschnitt 4.4.6** - untersuchten Einflussgrößen angenommen. Um diese Annahme zu bestätigen, wird exemplarisch die Stuhlanzahl und die Stuhlhöhe variiert.

4.5.6.1 Stuhlanzahl

Wie bei den Tischen wird die Anzahl der Stühle (4 / 8 / 10 / 16 / 20) variiert, um die Anwendbarkeit des Umrechnungsalgorithmus zu prüfen. Analog dem Ergebnis bei Variation der Tischanzahl wird eine Aussage erwartet, welche die Unabhängigkeit der **Formel (4-37)** von der Stuhlanzahl bestätigt. Die Simulationsergebnisse sind in der **Anlage I: Abbildung 61-I** ausgewiesen.

Aus dem Kurvenverlauf in **Abbildung 61-I** ist zu erkennen, dass kaum sichtbare Abweichungen der 2D- von der 3D-Simulation bei unterschiedlicher Anzahl der Sitzgelegenheiten feststellbar sind. Somit hat die veränderte Absorptionsfläche keinen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisgenauigkeit.

4.5.6.2 Stuhlhöhe

Die Stuhlhöhe wird in einem realistischen Größenbereich verändert und in der **Anlage I: Abbildung 62-I** ausgewiesen.

- Stuhlhöhe 0,40 m
- Standardstuhlhöhe 0,50 m
- Stuhlhöhe 0,60 m

Aufgrund der Tatsache, dass die berechneten Verläufe (3D und 2D) der Nachhallzeit in der **Abbildung 62-I** alle identisch sind, kann die Vermutung bestätigt werden, dass die Stuhlhöhe (in diesem Größenbereich) keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.

4.5.7 Überprüfung mit STI-PA

In der nachfolgenden **Tabelle 21** werden die berechneten STI-PA-Werte im **Raum A** und **B** den Messwerten gegenüber gestellt.

Tabelle 21: Vergleich Messung und Simulation STI-PA bei Stühlen

Situation	HP	STI-PA _{mess}	STI-PA _{3D}	STI-PA _{2D}	STI-PA _{mess} - STI-PA _{3D}	STI-PA _{3D} - STI-PA _{2D}
Raum A, 4 Stühle	HP 1	0,570	0,575	0,578	-0,005	-0,003
	HP 2	0,518	0,561	0,563	-0,043	-0,002
	HP 3	0,528	0,563	0,568	-0,035	-0,005
Raum A, 8 Stühle	HP 1	0,582	0,596	0,597	-0,014	-0,001
	HP 2	0,528	0,574	0,578	-0,046	-0,004
	HP 3	0,538	0,582	0,584	-0,044	-0,002
Raum A, 10 Stühle	HP 1	0,606	0,609	0,604	-0,003	0,005
	HP 2	0,568	0,588	0,590	-0,020	-0,002
	HP 3	0,586	0,592	0,594	-0,006	-0,002
Raum A, 16 Stühle	HP 1	0,624	0,627	0,628	-0,003	-0,001
	HP 2	0,566	0,604	0,608	-0,038	-0,004
	HP 3	0,584	0,612	0,615	-0,028	-0,003

Fortsetzung Tabelle 21: Vergleich Messung und Simulation STI-PA bei Stühlen

Situation	HP	STI-PA _{mess}	STI-PA _{3D}	STI-PA _{2D}	STI-PA _{mess} - STI-PA _{3D}	STI-PA _{3D} - STI-PA _{2D}
Raum A, 20 Stühle	HP 1	0,630	0,635	0,642	-0,005	-0,007
	HP 2	0,580	0,620	0,623	-0,040	-0,003
	HP 3	0,578	0,621	0,625	-0,043	-0,004
Raum B, 4 Stühle	HP 1	0,680	0,678	0,676	0,002	0,002
	HP 2	0,628	0,658	0,659	-0,030	-0,001
	HP 3	0,638	0,665	0,662	-0,027	0,003
Raum B, 8 Stühle	HP 1	0,686	0,685	0,683	0,001	0,002
	HP 2	0,642	0,666	0,665	-0,024	0,001
	HP 3	0,640	0,671	0,672	-0,031	-0,001
Raum B, 10 Stühle	HP 1	0,704	0,688	0,688	0,016	0,000
	HP 2	0,642	0,672	0,671	-0,030	0,001
	HP 3	0,648	0,675	0,673	-0,027	0,002
Raum B, 16 Stühle	HP 1	0,708	0,700	0,702	0,008	-0,002
	HP 2	0,650	0,683	0,685	-0,033	-0,002
	HP 3	0,658	0,684	0,686	-0,026	-0,002
Raum B, 20 Stühle	HP 1	0,710	0,710	0,711	0,000	-0,001
	HP 2	0,658	0,689	0,692	-0,031	-0,003
	HP 3	0,668	0,692	0,695	-0,024	-0,003

Die **Tabelle 21** zeigt, dass die berechneten STI-PA-Werte in guter Näherung mit den Messwerten vergleichbar sind. Mit zunehmender Bestuhlung steigt – wie erwartet – die Sprachverständlichkeit. Die Simulationen mit 2D- und 3D-Tischen weisen eine annähernd identische Sprachverständlichkeit auf. Die Vorgabe der maximal zulässigen Abweichung von $\leq 0,05$ wird eingehalten.

4.5.8 Ergebnisse 2D-/3D-Stuhldarstellung

Da der Umrechnungsalgorithmus für Stühle

$$\alpha_{\text{Stuhl},2D} = 0,970 * \alpha_{\text{Stuhl},3D} + 0,925 * \alpha_{\text{Boden}}$$

auf dem Prinzip der Abschattung – ähnlich, wie bei den Tischen – basiert, sollte er in gleicherweise relativ unabhängig von der restlichen Raumabsorption, einer realistischen Stuhlhöhe, der Stuhlanzahl, der Lautsprecheranordnung und der Raumform und -größe anwendbar sein.

Die durchgeführten exemplarischen Variationen der Einflussfaktoren beweisen dies und so bleiben die Abweichungen der Nachhallzeit zwischen den unterschiedlichen Stuhldarstellungen $< 0,10$ s und die des STI-PA $\leq 0,05$.

5 Zusammenfassung

Ziel der Diplomarbeit war es, das Mobiliar bei raumakustischen Prognoseberechnungen zu berücksichtigen. Neben der 3D-Darstellung dieser Einrichtungsgegenstände wurden Umrechnungsalgorithmen entwickelt, mit welchen der Einfluss des jeweiligen 3D-Mobiliars auf eine vereinfachte 2D-Fläche in der Raumsimulationssoftware EASE übertragen werden kann. Als Grundlage hierfür wurden:

- detaillierte akustische Daten (insbesondere die Schallabsorptionsgrade und die akustisch wirksame Fläche) zum Mobiliar und
- eine optimale Berücksichtigung derselben in den Berechnungsmodellen

erarbeitet. Damit die grundlegenden raumakustischen Eigenschaften des Mobiliars mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden können, erfolgten umfangreiche Messungen – der Nachhallzeit und der Sprachverständlichkeit (STI-PA) - in einem kubisch geformten Raum (Büroraum) mit und ohne raumakustischer Maßnahme. Diese Messergebnisse bildeten die Grundlage zur rechnerischen Ermittlung der raumakustischen Daten des – in der Untersuchung einbezogenen – Mobiliars.

Voraussetzung für die Gültigkeit der Modellrechnungen mit Ray Tracing-Algorithmen war die richtige Wahl der Eingangsparameter und die korrekte Interpretation der simulierten Ergebnisse. Dabei war es unerlässlich, wie bei den durchgeführten Simulationen, einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand zu finden (s. **Abschnitt 3.2.**).

Für die Einrichtungsgegenstände Schrank, Kombination aus Schrank und Regal, sowie Tische und unbesetzte Stühle konnten Umrechnungsalgorithmen für den Absorptionsgrad zur Besetzung einer 2D-Mobiliarfläche – auf Basis konstant bleibender äquivalenter Schallabsorptionsflächen des Mobiliars - erarbeitet werden (s. **Abschnitt 4.2 f.**). Allgemein gilt:

$$A_{\text{Mobiliar},3D} = A_{\text{Mobiliar},2D}$$

Bei der Umrechnung der Absorptionsgrade von Tischen und Stühlen wurde zusätzlich die Abschattung der Schallteilchen von der Mobiliarunterseite bzw. der betrachteten Bodenfläche durch entsprechende Faktoren mit berücksichtigt.

Die spezifisch entwickelten Umrechnungsalgorithmen des Mobiliars wurden durch Variation verschiedener Einflussfaktoren auf ihren Gültigkeitsbereich überprüft. Sie gelten nur unter den genannten jeweiligen Bedingungen (s. **Abschnitt 4**) und gewährleisten in diesem Bereich vergleichbare Modellprognosen, wie bei der 3D-Darstellung des Mobiliars.

Die maximalen Abweichungen der berechneten Nachhallzeiten, zwischen 2D- und 3D-Mobiliar, liegen unter der Vorgabe von $\pm 0,10$ s. Gleiches gilt bei der berechneten Sprachverständlichkeit in Form des STI-PA mit Abweichungen kleiner $\pm 0,05$.

Bei den Messungen hat sich gezeigt, dass - bei einem hohen Möblierungsanteil - raumakustische Maßnahmen oftmals nicht zwingend notwendig sind bzw. in reduzierter Form (vorrangiger Verzicht auf Tiefenabsorber bzw. kleinere Absorberflächen) zum Einsatz kommen können. Somit kann bei der raumakustischen Planung die Kostenbelastung für den Auftraggeber gemindert werden, wenn das Mobiliar hinreichend berücksichtigt wird (s. Anwendungsbeispiel und Ablaufschema in **Anlage J**).

6 **Ausblick**

In Zukunft können die ermittelten Absorptionsgrade von Einrichtungsgegenständen entsprechend einer realistischen Variationsbreite bei der Simulation mit EASE angewendet und auf eine 2D-Fläche umgerechnet werden. Es sind jedoch weitere umfangreiche Messungen von Nachhallzeit, STI/STI-PA und anderen raumakustischen Kriterien notwendig, um die raumakustische Wirkung verschiedenster mobiler Einbauten zu ermitteln.

Weiterhin sollte der Einfluss des Mobiliars auf diese Kriterien bei anderen Raumformen und -eigenschaften untersucht und modellhaft nachgebildet werden.

Problematisch gestaltet sich immer noch die Übertragung von Absorptionsgraden, welche durch Modellkalibrierung ermittelt wurden, auf Räume mit anderen akustischen Raumbooberflächen. Ebenso ist es erforderlich, intensive Untersuchungen zu den Streueigenschaften bestimmter Materialien und Einbauten durchzuführen, um umfangreiche Datenbanken anzulegen.

Ein grundlegendes Problem ist die Vernachlässigung von Beugungs- und Interferenzerscheinungen in vielen Simulationsprogrammen. Dadurch kommt es unweigerlich zu Differenzen zwischen Prognoseberechnung und Messung.

Anlagen

Anlage A: Programmmodul AURA

Ein sehr leistungsfähiges Werkzeug zur akustischen Analyse in EASE stellt das Modul **AURA** (Analysis Utility for Room Acoustics) dar. Damit bietet sich die Möglichkeit, aus einem Echogramm bzw. Reflektogramm neben der Nachhallzeit auch raumakustische Parameter nach ISO 3382 basierend auf den CAESAR-Algorithmen der Universität Aachen (RWTH) zu berechnen. /19/

CAESAR

Mit **CAESAR** (Computer Aided Evaluation, Simulation and Auralisation of Room acoustics) können verschiedenste raumakustische Kennwerte basierend auf der geometrischen Raumakustik, welche mit diffusen Reflexionen ergänzt wird, berechnet werden. Schallstrahlen werden entsprechend einem hybriden Algorithmus aus Cone Tracing und Teilchenverfolgung durch den Raum verfolgt. Aus den gewonnenen Raumimpulsantworten können die gewünschten Parameter bestimmt werden. Weiterhin ist es möglich, Raumimpulsantworten zu berechnen, welche zur binauralen Auralisation geeignet sind. CAESAR arbeitet mit Simulationsdateien, deren Daten sich in folgende Gruppen einordnen lassen /24/:

Raumbezogene Daten

- geometrische Wanddaten
- akustische Wanddaten
- Beschreibung des Mediums
- Position, Ausrichtung, frequenz- und richtungsabhängige LSP-Charakteristik
- Position, Ausrichtung, frequenz- und richtungsabhängige Empfindlichkeit der Detektoren
- Position und Ausrichtung der Reflektoren

Daten zur Ablaufsteuerung

- Auswahl durchzuführender Algorithmen und gewünschter Ergebnisse
- Steuerdatensätze für die einzelnen Simulationsalgorithmen

Simulationsverfahren in AURA

Im Gegensatz zu statistischen Simulationen sollen mit AURA detailliertere Aussagen zur Akustik eines Raumes gemacht werden können.

Die bisher verwendeten *Ray Tracing* und *Mirror Image* Reflexionsuntersuchungen bieten zwar eine größere Genauigkeit als die statistischen Untersuchungen, gehen aber mit langen Rechenzeiten einher. Meist ist das Hinzufügen eines statistischen „Nachhallschwanzes“ unerlässlich.

Die verwendeten CAESAR-Algorithmen in AURA verringern die erforderliche Rechenzeit, wodurch mitunter Reflektogramme über die gesamte Impulsantwortlänge berechnet werden können.

AURA bietet zwei Simulationsverfahren, *AURA Mapping* und *AURA Response*. In *AURA Mapping* wird ein Echogramm erzeugt, woraus akustische Parameter für Hörerflächen (Echogramm an jedem Gitterpunkt) oder Hörerplätze (Echogramm nur an diesem Punkt) abgeleitet werden. Bei zufällig verteilter Anordnung der Hörerplätze kann man einen Überblick über die akustischen Raumwirkungen erhalten. Mit *AURA Response* ist es möglich, aus einem berechneten Reflektogramm eine binaurale Impulsantwort für die Auralisation zu generieren (wird hier nicht betrachtet).

In AURA wird ein hybrides Verfahren verwendet, wobei im frühen Teil eine Art **Cone Tracing** Einsatz findet, während im späten Teil ein **Teilchen-basiertes Verfahren** genutzt wird. Mit zunehmender Anzahl ausgesandter Strahlen steigen die Dichte des Echogrammes und die Genauigkeit. *AURA Mapping* bietet neben *Energy Loss* (Energieverringern) als Verfahren zur Schallausbreitung *Particle Loss* (Teilchenannihilation). Bei ersterem wird die Energie bei jeder Wandreflexion um $(1 - \alpha)$ verringert. Bei letzterem bleibt die Energie bei jeder Wandreflexion konstant. Durch Vergleich einer Zufallszahl (0 - 1) mit dem Absorptionsgrad der Fläche wird entschieden, ob der Strahl weiterverfolgt wird oder nicht. Wenn nicht eine sehr hohe Strahlendichte gewählt wird, ist *Energy Loss* aufgrund seiner höheren Genauigkeit vorzuziehen. *Particle Loss* ist einzusetzen, wenn nicht die zeitliche Feinstruktur, sondern die Energieverhältnisse (C_{50} , Total SPL ect.) interessant sind. Für hohe Rechenzeiten ergeben sich asymptotisch die gleichen Ergebnisse.

Entsprechend der Richtcharakteristik des Lautsprechers und dem Austrittswinkel wird in AURA die Teilchenenergie gewichtet. Alle Treffer an einem Empfänger (Zählballon $r = 1$ m) werden auf dessen Mittelpunkt (analog Spiegelquellverfahren) zurück gerechnet. Beugungseffekte können nicht berücksichtigt werden, ebenso sind Nachhallzeiterhöhungen infolge von Raummoden nicht simulierbar. Die Impulsantwort an dem jeweiligen Hörerplatz wird aus der registrierten Eintreffzeit, Einfallsrichtung, Energie und Reflexionsordnung des Teilchens berechnet. Für die Berechnung der Nachhallzeit wird die Rückwärtsintegration nach Schroeder verwendet. /19/

Streuung in AURA

EASE unterstützt neben dem Absorptionsgrad für Materialien die Verwendung von Streukoeffizienten. Offensichtlich ist es nicht immer ausreichend, nur die Absorptionswerte einer Oberfläche zu kennen. In der Software gibt es drei Möglichkeiten, diesen Einfluss geltend zu machen. Zum einen im AURA Modul, wo neue Strahlen generiert werden können, sobald ein Strahl auf eine Oberfläche trifft. Ob ein Strahl gestreut wird, ist über Zufallszahlen geregelt. Dies geschieht solange, bis die neuen Strahlen auf einen Hörer (Listeners Seat) treffen. Der Energiegehalt der neuen Strahlen trägt der Streuung und der Absorption der Oberfläche Rechnung. Der Energiegehalt der primär spekulär reflektierten Strahlen ist um die Energie der Oberflächenabsorption und die Menge des Streuverlustes reduziert.

Um den Einfluss der simulierten Diffusion zu quantifizieren, wurde in früheren Versionen 5 % Streuung als Option angeboten. Es hat sich aber gezeigt, dass 10 % - 20 % realistischer sind, wenn dieses Feature genutzt wird.

Bei Vergabe der Kalkulationsparameter kann für alle Materialien ohne frequenzabhängigen Streukoeffizient dieser Streuanteil angegeben werden: /19/

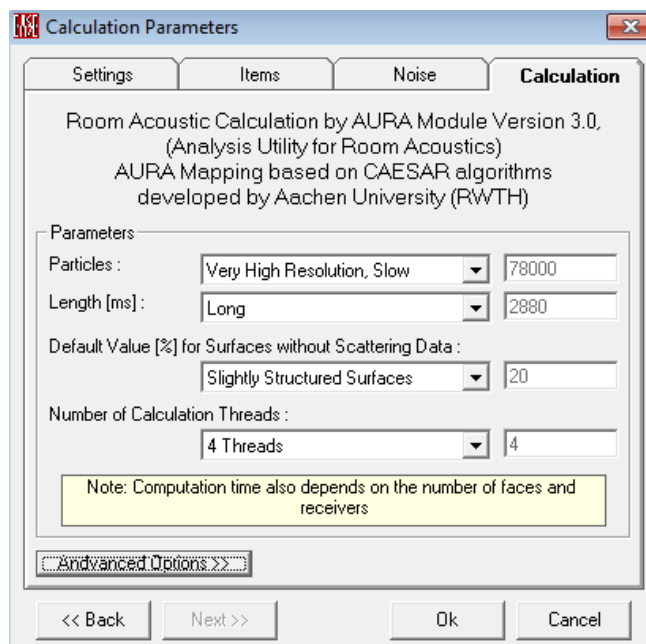


Abbildung 43-A: 20 % Streuung aller Oberflächen ohne Streukoeffizienten (EASE)

Sobald Streukoeffizienten bei Materialien definiert sind, ist diese Option für diese Materialien außer Kraft gesetzt. Bei der Anwendung frequenzabhängiger und materialspezifischer Streukoeffizienten kann der einfallende Schallstrahl mit gedämpfter Amplitude in viele verschiedene Richtungen zerstreut werden.

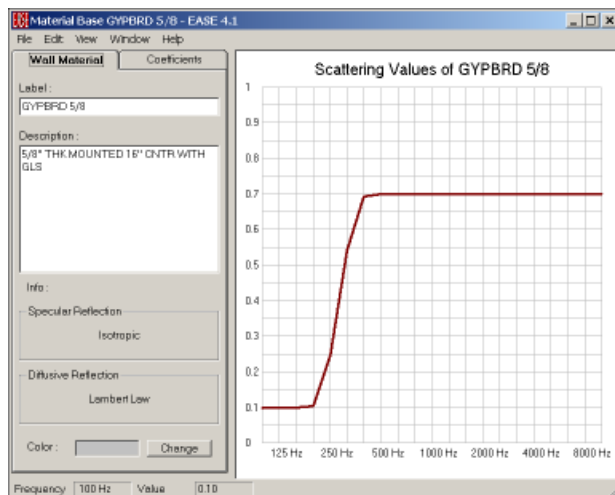


Abbildung 44-A: frequenzabhängiger Streukoeffizient (EASE)

Diese Werte fußen meist auf Erfahrungen, da es bis jetzt nur unzureichende Erkenntnisse zum Streuverhalten von Materialien gibt.

Basierend auf dem aus der Optik bekannten Lambertschen Gesetz werden idealisiert diffuse Reflexionen beschrieben. Damit können unebene Flächen als auch die Wirkung spezieller Diffusoren nachgebildet werden und somit die Modellierungs- und Rechenarbeit erleichtern.

Der *Scattering Wizard* bietet weitere Optionen, Streuungen zu simulieren. Er soll eine spezifische Approximation von Streukoeffizienten erlauben. Die Streucharakteristik wird basierend auf dem Absorptionsgrad des Materials und dessen Größe und Form (s. **Abbildung 45-A**) kalkuliert.

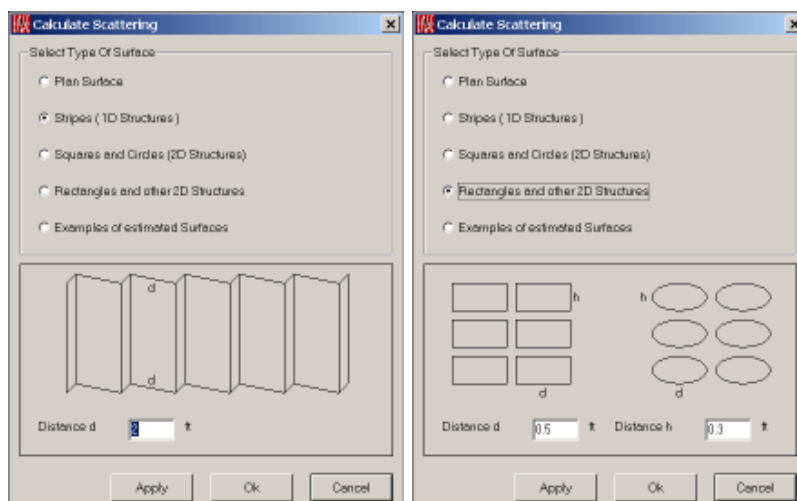


Abbildung 45-A: Auswahl der Materialfläche (EASE)

Arbeit mit AURA Mapping

Bei allen Simulationen wird mit *AURA Mapping* gearbeitet. Es folgt eine kurze Wegbeschreibung in EASE:

1. Pull-down-Menü im Bearbeitungsfenster: *Area Mapping / Mapping / Aura / Fenster Calculation Parameters*
2. Registerkarte *Settings: All Mappings*, Lautsprecher wählen
3. Registerkarte *Items*: On Seats, Listener Seats wählen
4. Registerkarte *Noise: Load File* (gemessenen Grundgeräuschpegel laden)
5. Registerkarte *Calculations*: Eingangsparameter wählen

Anlage B: Messverfahren, Geräte, Messbedingungen

Nachhallzeit

Entsprechend DIN EN ISO 3382 /16/ werden die Messungen der Nachhallzeit in Terzbändern von 100 Hz bis 5.000 Hz durchgeführt. Die Messungen erfolgen nach dem Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen (Rosa Rauschen).

Die Anordnung der Sender- und Empfängerpositionen sind in der **Abbildung 46-B** dargestellt. Zur Zeit der Messung befand sich eine Person im Raum.

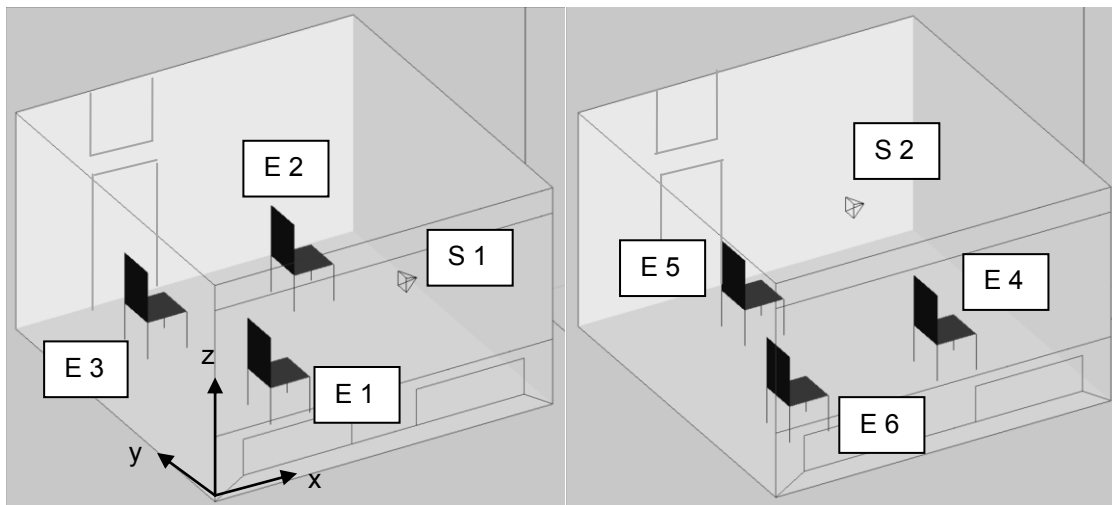


Abbildung 46-B: Sender (S)- und Empfängerpositionen (E)

Koordinaten [m] (x/y/z) ⁸ :	S 1	(3,5 / 1,2 / 1,5)
	E 1	(1,7 / 1,4 / 1,2)
	E 2	(3,3 / 3,6 / 1,2)
	E 3	(1,2 / 3,5 / 1,2)

Sender:	Dodekaeder-Lautsprecher
Sendsignal:	Rosa Rauschen
Empfänger:	Handschallpegelmesser

Genauigkeit:	Standard
Sender-Empfänger-Kombination:	6
Senderpositionen:	2
Empfängerpositionen je Senderposition:	3
Abklingvorgänge je Position:	2

⁸ Nur die Positionen von E 1 – E 3 und S 1 sind aufgeführt, da diese auch für die Modellsimulationen verwendet werden.

Sprachverständlichkeit STI-PA

Die Sprachverständlichkeit wird ermittelt aus der messtechnischen Bestimmung der Modulationstransferfunktionen nach DIN EN 60268-16: 2003 /17/.

Zur Reduzierung des Messaufwandes wird ein gekürztes, schnelleres Verfahren zur Bestimmung der Sprachverständlichkeit verwendet. Dieser STI-PA liefert unter der Voraussetzung, dass keine impulshaltigen Hintergrundgeräusche auftreten und keine massiven nichtlinearen Verzerrungen vorliegen, qualitätsmäßig vergleichbare Ergebnisse wie der STI.

Üblicherweise liefert die wiederholte Messung keine identischen Ergebnisse, da das Prüfsignal ein bandbegrenztes bzw. Pseudorauschen ist. Die Ergebnisse streuen aber mit einer bestimmten Standardabweichung um einen Mittelwert (s. **Anlage E: Tabelle 30-E** und **Tabelle 31-E**). /17/

Die Anordnung der Sende- und Empfängerpositionen sind in der **Abbildung 46-B** links dargestellt. Zur Zeit der Messung befand sich eine Person im Raum.

Sender-Empfänger-Kombination:	3
Senderpositionen:	1
Empfängerpositionen:	3
Anzahl der Wiederholungen pro Position:	5
Messzeit:	15 s

Geräte

- (1) Handschallpegelmesser Sound Analyzer Typ 2260 B&K, Seriennummer: 2180628
- (2) Schallkalibrator Typ 4231 Klasse 1 B&K, Seriennummer: 2610213, 94/114 dB SPL – 1000 Hz, geeicht bis 2010
- (3) Dodekaeder-Lautsprecher Typ 229 Norsonic-Tippkemper GmbH, Seriennummer: 18457
- (4) NTI TalkBox NTI AG, Seriennummer: TNN 335, Testsignal STI-PA Standard 60 dB(A) / 1 m \pm 0,5 dB, nach IEC 60268-16
- (5) Acoustical Analyzer Acoustilyzer AL1 NTI AG, Seriennummer: AEK 857A2A2 mit Messmikrofon M2010
- (6) Thermometer, Hygrometer, Barometer

Messbedingungen

Temperatur: 20,1 °C
relative Luftfeuchtigkeit: 50,2 %
Luftdruck: 1011 hPa

Tabelle 22-B: Grundgeräuschpegel Raum A

Oktavband-Mittenfrequenz f [Hz]	Grundgeräuschpegel L _{Leq} [dB]
100	32,1
125	34,8
160	35,2
200	30,3
250	28,7
315	23,8
400	25,5
500	25,1
630	19,7
800	15,6
1000	17,1
1250	16,1
1600	14,7
2000	13,3
2500	14,0
3150	13,5
4000	12,8
5000	12,9
6300	12,3
8000	11,6
10000	11,4

Anlage C: Absorptionsgrade

Tabelle 23-C: Absorptionsgrade von Raumbegrenzungsmaterialien (Literatur)

Material	Quelle	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Beton, verputztes Mauerwerk	/14/	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Beton	/3/	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Tapete, Gipskartonplatten	/3/	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
Tapete	/4/	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,08
Teppich, bis 6 mm dick	/15/	0,02	0,04	0,06	0,20	0,30	0,35
Teppichboden bis etwa 5 mm dick	/3/	0,03	0,04	0,06	0,20	0,30	0,40
Fenster, Spiegel	/3/	0,12	0,10	0,05	0,04	0,02	0,02
Isolier-, Kasten-, Verbundfenster	/15/	0,28	0,20	0,10	0,06	0,03	0,02
Tür, Holz, lackiert	/3/	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
Türen (Holz)	/14/	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Streukörper aus Metall	/3/	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06

Tabelle 24-C: Übersicht Absorptionsgrade

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Beton	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
Tapete auf Gipskarton	0,03	0,02	0,02	0,04	0,06	0,07
Teppich < 5 mm	0,03	0,05	0,09	0,17	0,28	0,32
Isolierglasfenster	0,23	0,14	0,09	0,04	0,03	0,02
Holztür	0,13	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08
Heizkörper	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
Alu-Leuchten	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04
Deckenabsorber	0,13	0,37	0,79	0,79	0,43	0,03
Schrank, 3D	0,55	0,23	0,14	0,13	0,24	0,37
Schrank, (1,6 x 1,2) m, 2D	1,05	0,45	0,27	0,24	0,46	0,70
Schrank, halbe Breite (1,6 x 0,6) m, 2D	1,42	0,61	0,36	0,33	0,62	0,95
Schrank, doppelte Breite (1,6 x 2,4) m, 2D	0,87	0,37	0,22	0,20	0,38	0,58
Schrank, halbe Höhe (0,8 x 1,2) m, 2D	1,19	0,51	0,30	0,27	0,52	0,79
Regalfront (halbvoll mit Ordnern)	0,31	0,09	0,23	0,49	0,51	0,56
Schränke/Regale, einseitig, 20 % Wandbelegung (2,4 x 1,2 x 0,4) m, 2D	0,89	0,36	0,30	0,42	0,58	0,77
Schränke/Regale, einseitig, 40 % Wandbelegung (2,4 x 2,4 x 0,4) m, 2D	0,71	0,28	0,25	0,37	0,50	0,65
Schränke/Regale, einseitig, 60 % Wandbelegung (2,4 x 3,6 x 0,4) m, 2D	0,59	0,23	0,22	0,34	0,44	0,57
Schränke/Regale, einseitig, 80 % Wandbelegung (2,4 x 4,8 x 0,4) m, 2D	0,53	0,20	0,21	0,33	0,41	0,52
Tisch, 3D	0,21	0,12	0,09	0,07	0,10	0,11
Tisch, 2D	0,42	0,26	0,23	0,25	0,38	0,43
Stuhl (unbesetzt), 3D	0,10	0,15	0,31	0,38	0,46	0,36
Stuhl (unbesetzt), 2D	0,12	0,19	0,38	0,53	0,71	0,65

Anlage D: Simulationsgenauigkeit in EASE

Nachhallzeit

Um die dreifachen Standardabweichungen 3σ bzw. die Vertrauensbereiche $\Delta\bar{x}$ bei der Simulation an einem Empfänger (s. **Tabelle 25-D**) zu ermitteln, werden die Nachhallzeiten T_{30} am Hörerplatz HP 1 bei gleichen Bedingungen und Standardeinstellungen 20mal mit AURA berechnet.

Tabelle 25-D: wiederholte Berechnung der Nachhallzeit am HP 1

Mittelwert Nachhallzeit [s]	3σ (99,73 %) [s]	$\Delta\bar{x}$ (95,00 %) [s]	$\Delta\bar{x}$ (99,00 %) [s]
2,23	0,006	0,001	0,001
2,43	0,000	0,000	0,000
2,24	0,009	0,001	0,002
1,50	0,008	0,001	0,002
0,98	0,005	0,001	0,001
0,79	0,011	0,002	0,002

Die berechneten Nachhallzeiten am HP 1 weichen nur minimal voneinander ab. Somit genügt die einmalige Berechnung je Detektor.

Da mit einer einzigen Impulsantwort bzw. einem Echogramm je Frequenz nicht der ganze Raum beschrieben werden kann, werden die Simulationsergebnisse über drei verschiedene Empfangspunkte (Hörerplatz 1, 2, 3) bei entsprechenden Standardeinstellungen gemittelt:

Tabelle 26-D: Mittelung der Nachhallzeit des Raumes über drei Empfänger

HP 1	HP 2	HP 3	Mittelwert	3σ (99,73 %) [s]
Nachhallzeit [s]				
2,23	2,23	2,24	2,23	0,006
2,43	2,43	2,43	2,43	0,012
2,25	2,25	2,25	2,25	0,006
1,50	1,50	1,50	1,50	0,000
0,97	0,98	0,98	0,98	0,010
0,79	0,79	0,79	0,79	0,006

Aus **Tabelle 26-D** ist zu entnehmen, dass sich die Ergebnisse der drei Hörerpositionen in diesem Modell kaum voneinander unterscheiden. Es ist jedoch anzunehmen, dass mit zunehmender Raumgröße und –komplexität dies nicht mehr der Fall sein wird.

STI-PA

Im Testmodell werden 5 Einzelberechnungen der STI-PA-Werte je Detektor durchgeführt. Die Standardeinstellungen werden beibehalten, nur der OMNI-Lautsprecher wird durch MAN NORM (Talkbox) ersetzt. Die Ergebnisse sind in der **Tabelle 27-D** aufgeführt. Der gemessene Grundgeräuschpegel (entspricht **Anlage B: Tabelle 22-B**) wird ebenfalls berücksichtigt.

Tabelle 27-D: wiederholte Berechnung der STI-PA-Werte

n	STI-PA		
	HP1	HP2	HP3
1	0,556	0,543	0,549
2	0,556	0,547	0,551
3	0,555	0,543	0,549
4	0,559	0,542	0,547
5	0,560	0,543	0,548
Mittelwert	0,557	0,544	0,549
3 σ (99,73 %)	0,007	0,006	0,004

Schlussfolgernd aus **Tabelle 27-D** weichen die berechneten STI-PA-Werte je Empfänger nur gering voneinander ab, somit genügt deren einmalige Berechnung.

Tabelle 28-E: Messwerte der Nachhallzeiten im Raum A

Frequenz [Hz]	leer	2 Tische	4 Tische	5 Tische	8 Tische	10 Tische	4 Stühle	8 Stühle	10 Stühle	16 Stühle	20 Stühle	Schrank	Schränke/Regale, einseitig (20% Wandbel.)	Schränke/Regale, einseitig (40% Wandbel.)	Schränke/Regale, einseitig (60% Wandbel.)	Schränke/Regale, einseitig (80% Wandbel.)	Schränke/Regale, verteilt (2 Wände je 20% Wandbel.)	Schränke/Regale, verteilt (3 Wände je 20% Wandbel.)	Schränke/Regale, verteilt (4 Wände je 20% Wandbel.)
	Nachhallzeit [s]																		
125	2,24	1,77	1,39	1,21	1,12	1,16	2,16	2,00	1,93	1,86	1,76	1,56	1,35	1,02	1,01	0,93	1,04	0,81	0,72
250	2,44	2,06	2,01	1,70	1,57	1,59	2,20	2,02	1,92	1,78	1,71	2,04	1,85	1,59	1,62	1,59	1,21	1,09	0,94
500	2,25	2,10	2,04	1,79	1,71	1,69	1,91	1,67	1,57	1,39	1,28	2,04	1,91	1,50	1,45	1,47	1,39	1,20	1,04
1000	1,50	1,43	1,43	1,34	1,37	1,35	1,31	1,15	1,13	1,02	0,96	1,43	1,35	1,14	0,98	0,95	1,14	0,98	0,87
2000	0,97	0,93	0,92	0,88	0,90	0,93	0,85	0,79	0,75	0,72	0,71	0,93	0,91	0,79	0,71	0,69	0,80	0,70	0,67
4000	0,79	0,71	0,71	0,71	0,72	0,75	0,69	0,66	0,65	0,65	0,65	0,70	0,75	0,63	0,56	0,55	0,63	0,55	0,53
	3σ (99,73 %) [s]																		
125	0,540	0,330	0,240	0,360	0,390	0,330	0,420	0,570	0,330	0,240	0,300	0,450	0,240	0,360	0,330	0,330	0,360	0,510	0,330
250	0,480	0,570	0,480	0,420	0,270	0,450	0,570	0,330	0,420	0,330	0,540	0,390	0,390	0,540	0,600	0,480	0,270	0,480	0,390
500	0,270	0,450	0,600	0,330	0,390	0,240	0,300	0,390	0,240	0,210	0,300	0,420	0,300	0,330	0,360	0,390	0,270	0,270	0,240
1000	0,210	0,210	0,240	0,180	0,390	0,210	0,180	0,270	0,330	0,240	0,330	0,150	0,240	0,270	0,240	0,120	0,360	0,270	0,240
2000	0,150	0,060	0,120	0,090	0,060	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,060	0,060	0,060	0,060	0,090	0,060	0,090	0,090	0,060
4000	0,120	0,060	0,060	0,120	0,030	0,060	0,030	0,060	0,090	0,060	0,090	0,060	0,210	0,090	0,030	0,030	0,090	0,030	0,030

Tabelle 29-E: Messwerte der Nachhallzeiten im Raum B

Frequenz [Hz]	leer	2 Tische	4 Tische	5 Tische	8 Tische	10 Tische	4 Stühle	8 Stühle	10 Stühle	16 Stühle	20 Stühle	Schrank	Schränke/Regale, einseitig (20% Wandbel.)	Schränke/Regale, einseitig (40% Wandbel.)	Schränke/Regale, einseitig (60% Wandbel.)	Schränke/Regale, einseitig (80% Wandbel.)	Schränke/Regale, verteilt (2 Wände je 20% Wandbel.)	Schränke/Regale, verteilt (3 Wände je 20% Wandbel.)	Schränke/Regale, verteilt (4 Wände je 20% Wandbel.)
	Nachhallzeit [s]																		
125	1,68	1,47	1,22	1,18	1,02	0,85	1,65	1,61	1,59	1,56	1,55	1,33	1,29	1,12	0,90	0,71	0,85	0,73	0,50
250	1,24	1,17	1,05	1,00	0,89	0,82	1,16	1,14	1,14	1,07	1,05	0,97	0,99	0,79	0,65	0,64	0,73	0,60	0,49
500	0,79	0,73	0,72	0,70	0,66	0,66	0,74	0,70	0,68	0,63	0,63	0,72	0,71	0,58	0,52	0,51	0,59	0,58	0,47
1000	0,71	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,66	0,64	0,65	0,61	0,59	0,63	0,62	0,52	0,46	0,45	0,52	0,51	0,44
2000	0,72	0,65	0,67	0,65	0,65	0,64	0,71	0,68	0,66	0,67	0,67	0,64	0,58	0,48	0,44	0,43	0,51	0,46	0,42
4000	0,80	0,72	0,71	0,73	0,69	0,66	0,76	0,77	0,76	0,73	0,74	0,66	0,60	0,52	0,46	0,47	0,53	0,46	0,43
	3σ (99,73 %) [s]																		
125	0,360	0,450	0,240	0,480	0,330	0,240	0,480	0,330	0,300	0,540	0,360	0,150	0,420	0,120	0,330	0,300	0,510	0,420	0,270
250	0,330	0,300	0,450	0,330	0,360	0,300	0,390	0,300	0,270	0,420	0,360	0,300	0,420	0,390	0,390	0,300	0,120	0,150	0,150
500	0,240	0,150	0,240	0,150	0,090	0,240	0,420	0,150	0,210	0,210	0,150	0,210	0,150	0,150	0,270	0,180	0,300	0,150	0,120
1000	0,090	0,180	0,120	0,090	0,090	0,090	0,150	0,090	0,150	0,180	0,150	0,090	0,150	0,090	0,120	0,090	0,090	0,090	0,090
2000	0,120	0,060	0,150	0,150	0,120	0,090	0,180	0,120	0,150	0,120	0,150	0,090	0,030	0,060	0,060	0,030	0,120	0,060	0,060
4000	0,150	0,180	0,030	0,300	0,060	0,060	0,090	0,240	0,180	0,090	0,120	0,060	0,060	0,030	0,030	0,030	0,060	0,030	0,060

Tabelle 30-E: gemessene STI-PA-Werte im Raum A

Raum A	Mittelwerte STI-PA			3 σ (99,73 %)		
	HP 1	HP 2	HP 3	HP 1	HP 2	HP 3
leer	0,554	0,508	0,522	0,034	0,025	0,033
2 Tische	0,574	0,542	0,538	0,034	0,025	0,025
4 Tische	0,578	0,522	0,550	0,025	0,049	0,021
5 Tische	0,582	0,518	0,528	0,039	0,039	0,033
8 Tische	0,582	0,532	0,544	0,039	0,025	0,016
10 Tische	0,578	0,538	0,550	0,025	0,025	0,037
4 Stühle	0,570	0,518	0,528	0,037	0,025	0,033
8 Stühle	0,582	0,528	0,538	0,039	0,049	0,025
10 Stühle	0,606	0,568	0,586	0,027	0,025	0,040
16 Stühle	0,624	0,566	0,584	0,045	0,034	0,034
20 Stühle	0,630	0,580	0,578	0,030	0,037	0,025
Schrank	0,582	0,526	0,546	0,025	0,045	0,045
Schränke/Regale, einseitig (20% Wandbelegung)	0,580	0,536	0,548	0,037	0,034	0,039
Schränke/Regale, einseitig (40% Wandbelegung)	0,630	0,566	0,602	0,030	0,027	0,039
Schränke/Regale, einseitig (60% Wandbelegung)	0,652	0,570	0,608	0,039	0,030	0,025
Schränke/Regale, einseitig (80% Wandbelegung)	0,652	0,572	0,622	0,033	0,025	0,039
Schränke/Regale, verteilt (2 Wände je 20% Wandbelegung)	0,620	0,556	0,574	0,030	0,034	0,034
Schränke/Regale, verteilt (3 Wände je 20% Wandbelegung)	0,648	0,588	0,622	0,033	0,025	0,033
Schränke/Regale, verteilt (4 Wände je 20% Wandbelegung)	0,690	0,606	0,644	0,030	0,034	0,034

Tabelle 31-E: gemessene STI-PA-Werte im Raum B

Raum B	Mittelwerte STI-PA			3 σ (99,73 %)		
	HP 1	HP 2	HP 3	HP 1	HP 2	HP 3
leer	0,674	0,632	0,628	0,040	0,025	0,039
2 Tische	0,672	0,642	0,648	0,039	0,025	0,044
4 Tische	0,694	0,628	0,634	0,016	0,033	0,040
5 Tische	0,686	0,632	0,642	0,040	0,025	0,025
8 Tische	0,704	0,630	0,660	0,034	0,037	0,037
10 Tische	0,704	0,628	0,658	0,045	0,039	0,033
4 Stühle	0,680	0,628	0,638	0,030	0,025	0,025
8 Stühle	0,686	0,642	0,640	0,016	0,033	0,037
10 Stühle	0,704	0,642	0,648	0,016	0,025	0,033
16 Stühle	0,708	0,650	0,658	0,025	0,021	0,025
20 Stühle	0,710	0,658	0,668	0,047	0,025	0,025
Schrank	0,684	0,638	0,636	0,034	0,025	0,034
Schränke/Regale, einseitig (20% Wandbelegung)	0,728	0,648	0,658	0,025	0,025	0,025
Schränke/Regale, einseitig (40% Wandbelegung)	0,736	0,678	0,682	0,016	0,025	0,025
Schränke/Regale, einseitig (60% Wandbelegung)	0,720	0,670	0,666	0,030	0,030	0,034
Schränke/Regale, einseitig (80% Wandbelegung)	0,752	0,708	0,716	0,025	0,025	0,034
Schränke/Regale, verteilt (2 Wände je 20% Wandbelegung)	0,728	0,680	0,678	0,025	0,030	0,025
Schränke/Regale, verteilt (3 Wände je 20% Wandbelegung)	0,758	0,680	0,688	0,025	0,037	0,033
Schränke/Regale, verteilt (4 Wände je 20% Wandbelegung)	0,764	0,688	0,696	0,027	0,025	0,034

Anlage F: Schrank

Tabelle 32-F: berechnete 2D-Absorptionsgrade in Abhängigkeit der Schrankgröße

Frequenz [Hz]			halbe Breite	doppelte Breite	halbe Höhe
	$\alpha_{\text{Schränk,3D}}$	$\alpha_{\text{Schränk,2D}}$	$\alpha_{\text{Schränk,2D}}$	$\alpha_{\text{Schränk,2D}}$	$\alpha_{\text{Schränk,2D}}$
100	0,60	1,15*	1,55*	0,95	1,30*
125	0,60	1,15*	1,55*	0,95	1,30*
160	0,45	0,86	1,16*	0,71	0,98
200	0,30	0,58	0,78	0,48	0,65
250	0,22	0,42	0,57	0,35	0,48
315	0,18	0,35	0,47	0,29	0,39
400	0,16	0,31	0,41	0,25	0,35
500	0,14	0,27	0,36	0,22	0,30
630	0,12	0,23	0,31	0,19	0,26
800	0,12	0,23	0,31	0,19	0,26
1000	0,12	0,23	0,31	0,19	0,26
1250	0,14	0,27	0,36	0,22	0,30
1600	0,19	0,36	0,49	0,30	0,41
2000	0,24	0,46	0,62	0,38	0,52
2500	0,29	0,56	0,75	0,46	0,63
3150	0,34	0,65	0,88	0,54	0,74
4000	0,38	0,73	0,98	0,60	0,82
5000	0,38	0,73	0,98	0,60	0,82
$S_{\text{Schränk,3D}} [\text{m}^2]$		3,68	2,48	6,08	2,08
$S_{\text{Schränk,2D}} [\text{m}^2]$		1,92	0,96	3,84	0,96

* Eingabe 1,00 in EASE

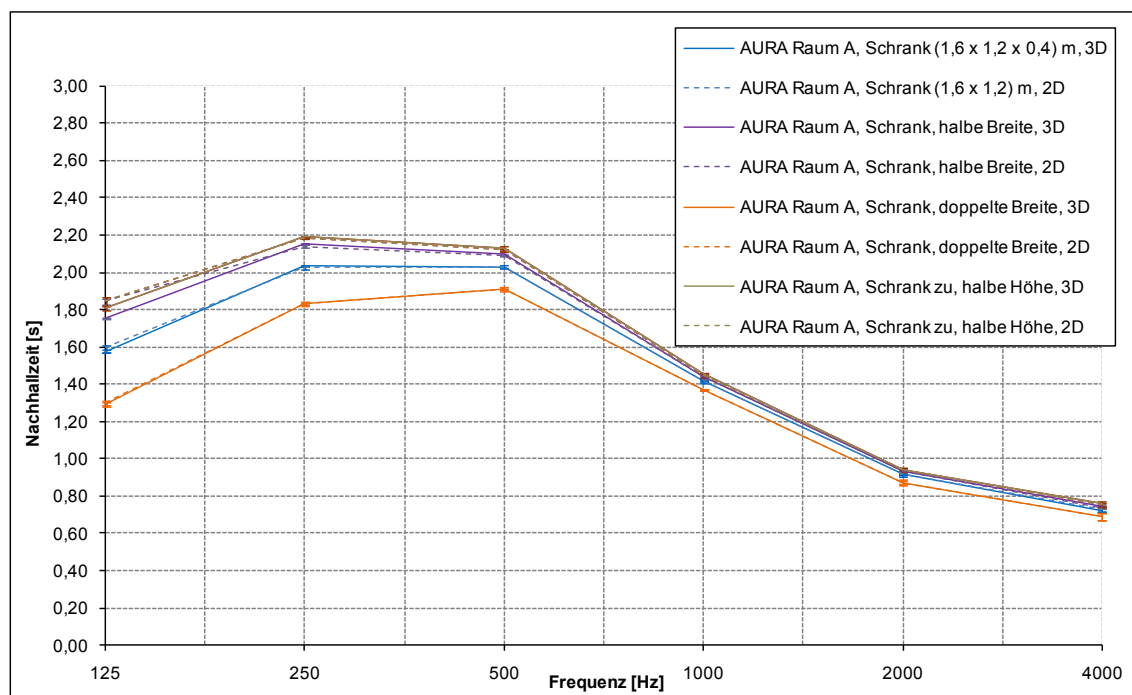
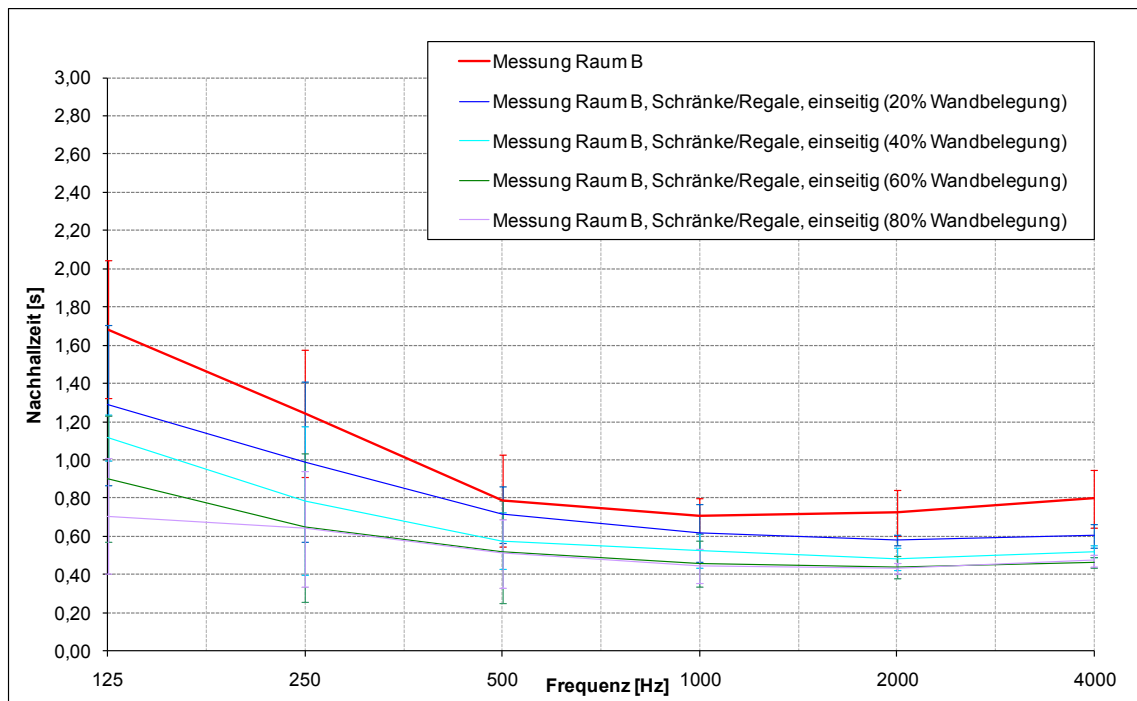
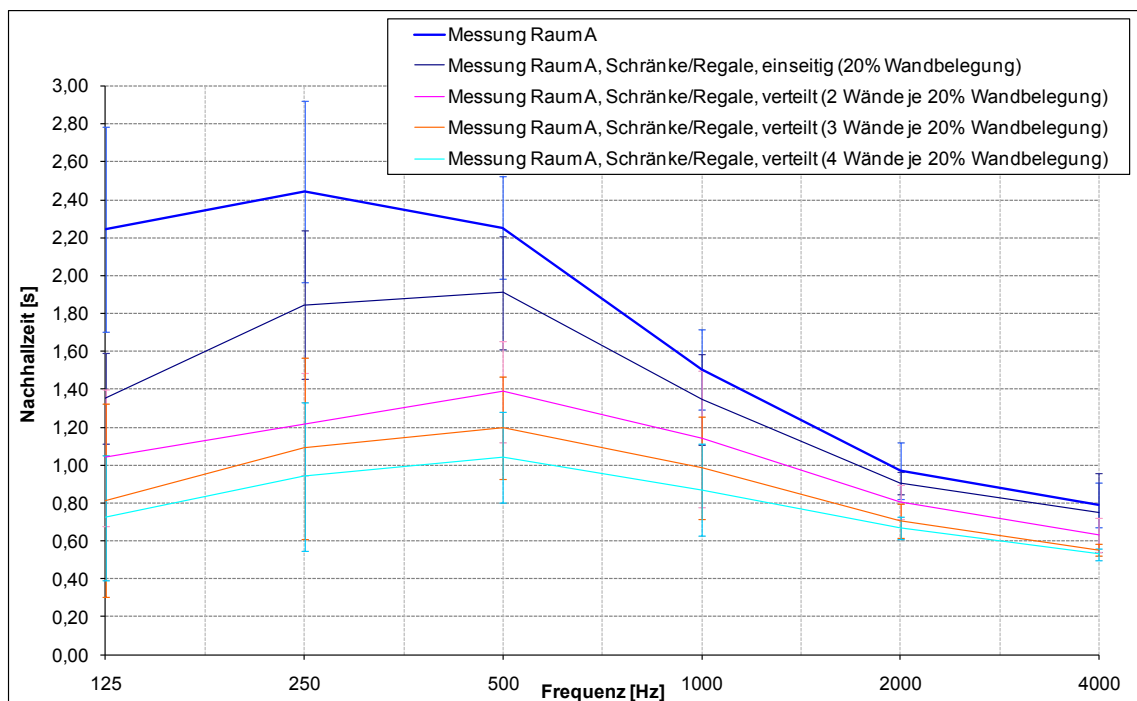


Abbildung 47-F: Berechnungen bei variabler Schrankgröße, Raum A

Anlage G: Kombination Schrank/Regal**Abbildung 48-G:** Messungen bei einseitiger Anordnung Schränke/Regale, Raum B**Abbildung 49-G:** Messungen bei verteilter Anordnung Schränke/Regale, Raum A

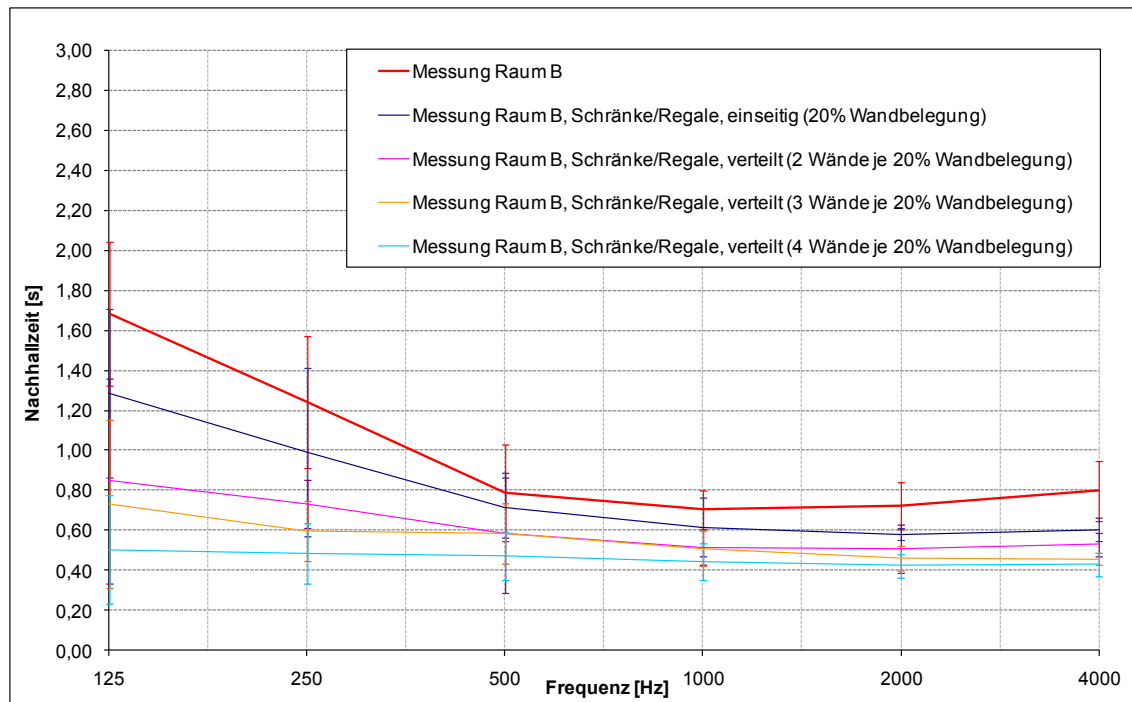


Abbildung 50-G: Messungen bei verteilter Anordnung Schränke/Regale, Raum B

Tabelle 33-G: 2D-Absorptionsgrade Schrank/Regal (variable Wandbelegung)

Frequenz [Hz]			80 % Wand- belegung	60 % Wand- belegung	40 % Wand- belegung	20 % Wand- belegung
	$\alpha_{\text{Schränk,3D}}$	$\alpha_{\text{Regalfront}}$	$\alpha_{\text{Schränk/Regal,2D}}$	$\alpha_{\text{Schränk/Regal,2D}}$	$\alpha_{\text{Schränk/Regal,2D}}$	$\alpha_{\text{Schränk/Regal,2D}}$
100	0,60	0,35	0,58	0,64	0,78	0,98
125	0,60	0,32	0,56	0,63	0,76	0,96
160	0,45	0,27	0,44	0,49	0,59	0,74
200	0,30	0,15	0,28	0,31	0,38	0,48
250	0,22	0,05	0,17	0,20	0,25	0,32
315	0,18	0,07	0,16	0,18	0,22	0,28
400	0,16	0,16	0,19	0,20	0,24	0,29
500	0,14	0,22	0,20	0,22	0,25	0,30
630	0,12	0,30	0,23	0,24	0,27	0,31
800	0,12	0,43	0,30	0,31	0,34	0,38
1000	0,12	0,52	0,34	0,35	0,38	0,42
1250	0,14	0,52	0,35	0,37	0,40	0,45
1600	0,19	0,51	0,38	0,40	0,45	0,51
2000	0,24	0,50	0,41	0,44	0,49	0,57
2500	0,29	0,52	0,45	0,49	0,55	0,65
3150	0,34	0,54	0,50	0,53	0,61	0,72
4000	0,38	0,56	0,53	0,58	0,66	0,79
5000	0,38	0,58	0,54	0,59	0,67	0,80
$S_{\text{Schränk,3D}}$ [m ²]			7,68	6,72	5,76	3,84
$S_{\text{Regalfront}}$ [m ²]			5,76	4,32	2,88	1,44
$S_{\text{Schränk/Regal,2D}}$ [m ²]			11,52	8,64	5,76	2,88

Anlage H: Tische

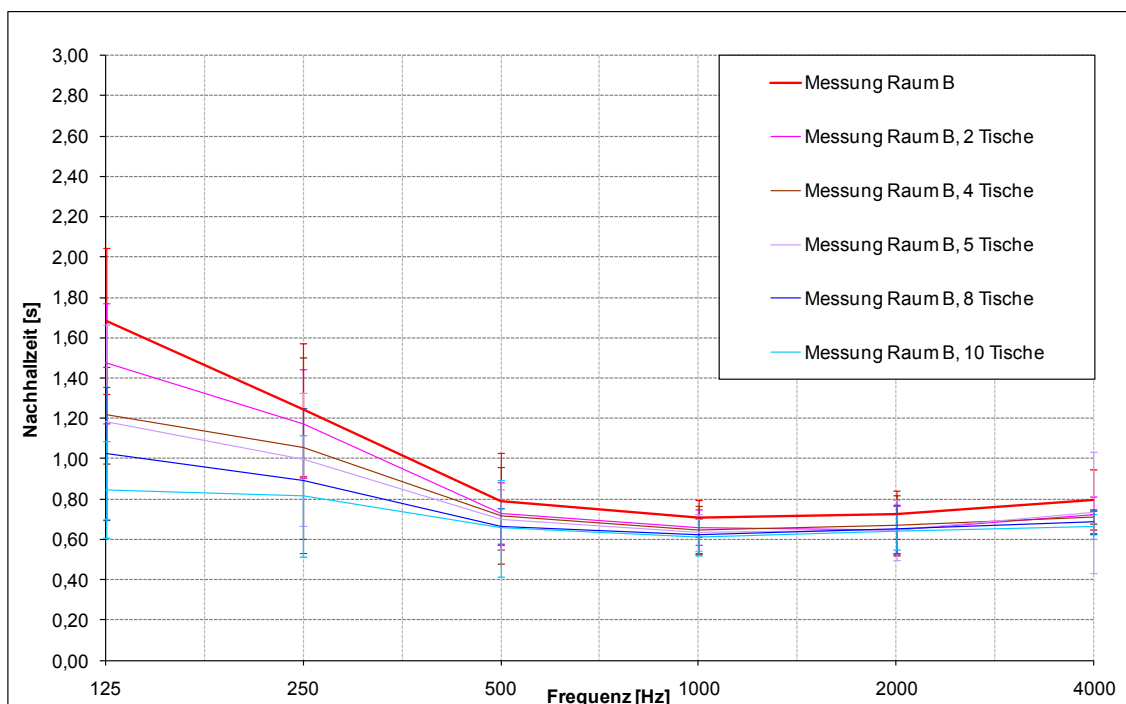


Abbildung 51-H: Messungen mit Tischen, Raum B

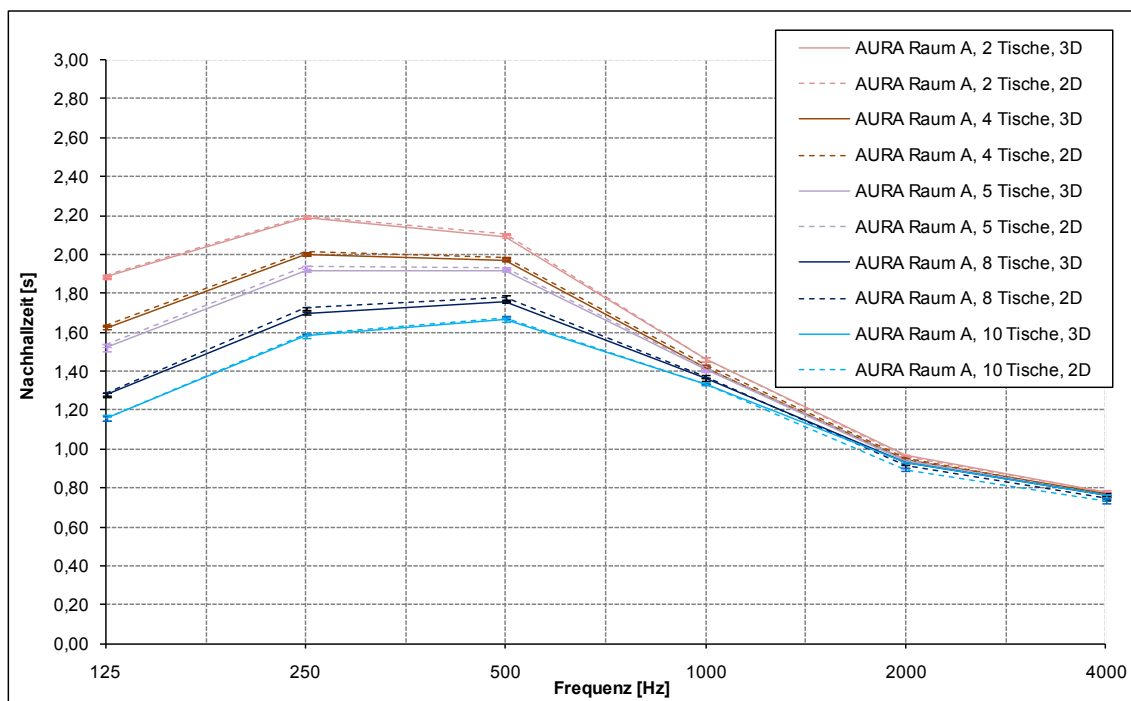


Abbildung 52-H: Berechnungen bei verschiedener Tischanzahl, Raum A

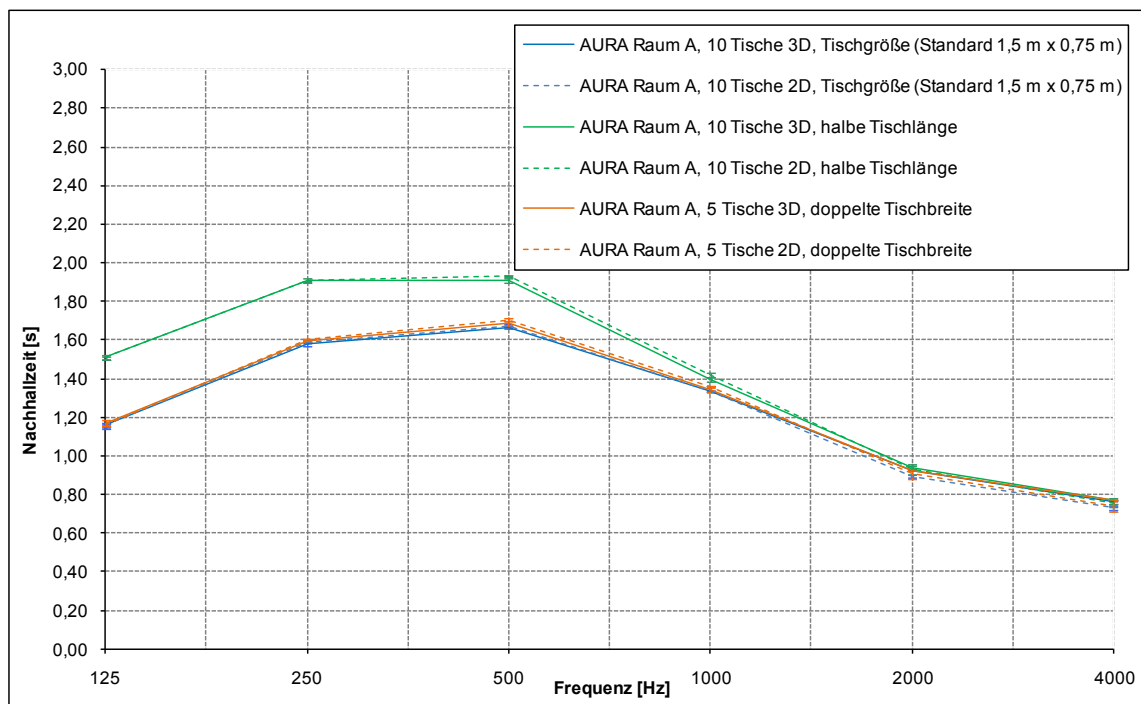


Abbildung 53-H: Berechnungen bei variablen Tischmaßen, Raum A

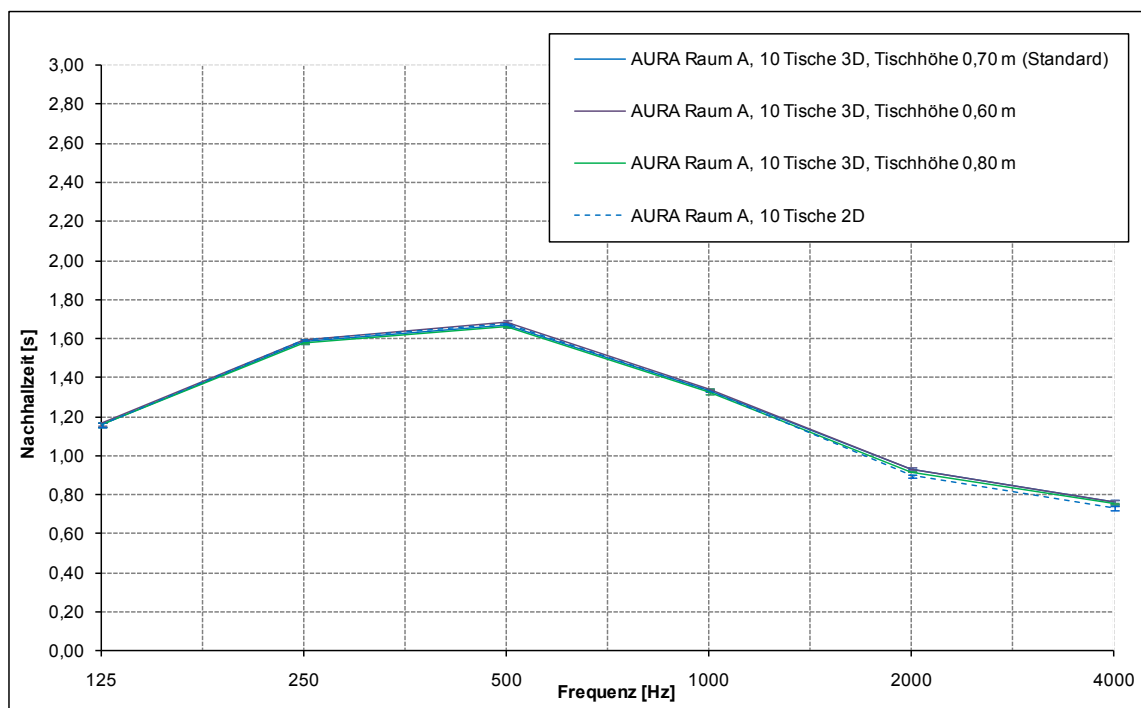


Abbildung 54-H: Berechnungen bei variablen Tischhöhen, Raum A

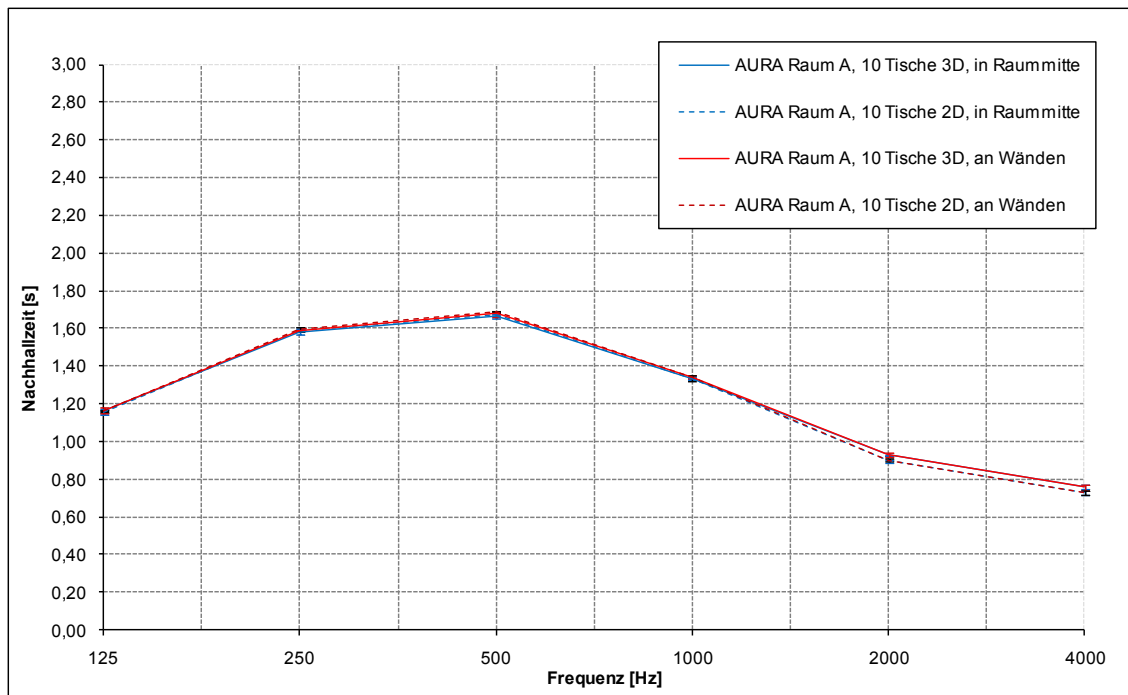


Abbildung 55-H: Berechnungen bei Variation der Tischposition, Raum A

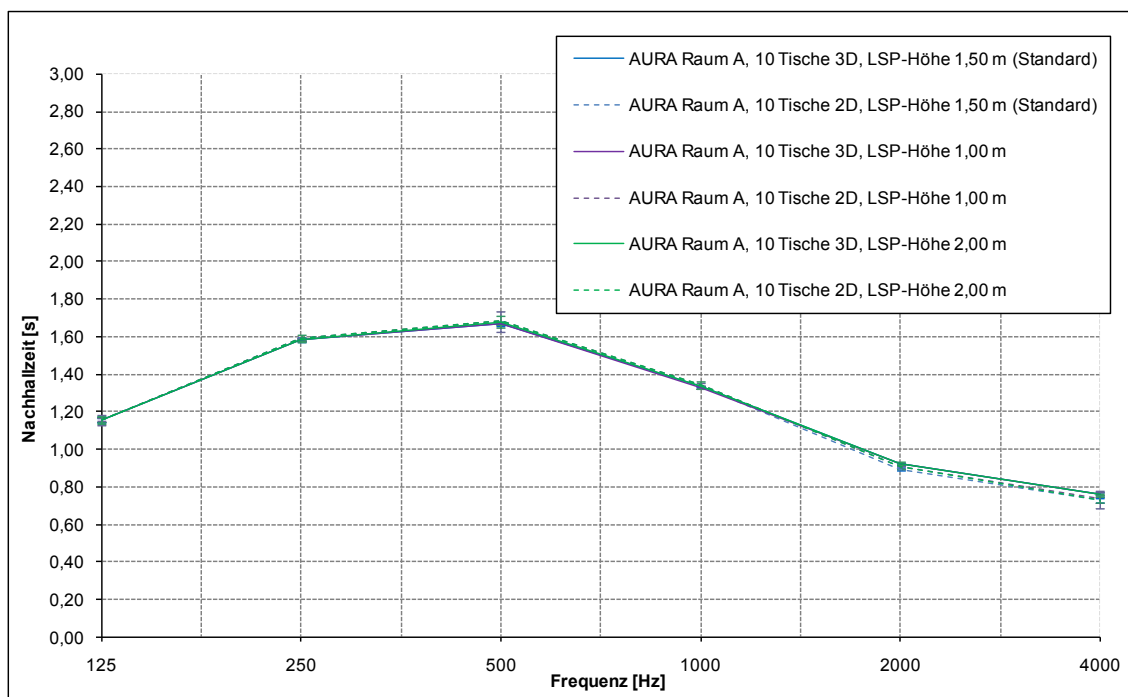


Abbildung 56-H: Berechnungen bei Variation der Lautsprecherhöhe, Raum A

Tabelle 34-H: berechnete 2D-Absorptionsgrade Tisch (andere 3D-Tischwerte)

Frequenz [Hz]	α_{Boden}	$\alpha_{\text{Tisch,3D}}$ (reflektierend)	$\alpha_{\text{Tisch,2D}}$	$\alpha_{\text{Tisch,3D}}$ (dämpfend)	$\alpha_{\text{Tisch,2D}}$
100	0,03	0,01	0,04	0,40	0,77
125	0,03	0,01	0,04	0,40	0,77
160	0,03	0,01	0,04	0,40	0,77
200	0,04	0,01	0,05	0,40	0,78
250	0,06	0,01	0,06	0,40	0,79
315	0,06	0,01	0,06	0,40	0,79
400	0,07	0,01	0,07	0,40	0,80
500	0,08	0,01	0,07	0,40	0,81
630	0,11	0,01	0,10	0,40	0,83
800	0,14	0,01	0,12	0,40	0,85
1000	0,17	0,01	0,14	0,40	0,87
1250	0,21	0,01	0,17	0,40	0,90
1600	0,26	0,01	0,20	0,40	0,93
2000	0,29	0,01	0,22	0,40	0,96
2500	0,30	0,01	0,23	0,40	0,96
3150	0,32	0,01	0,24	0,40	0,98
4000	0,32	0,01	0,24	0,40	0,98
5000	0,32	0,01	0,24	0,40	0,98

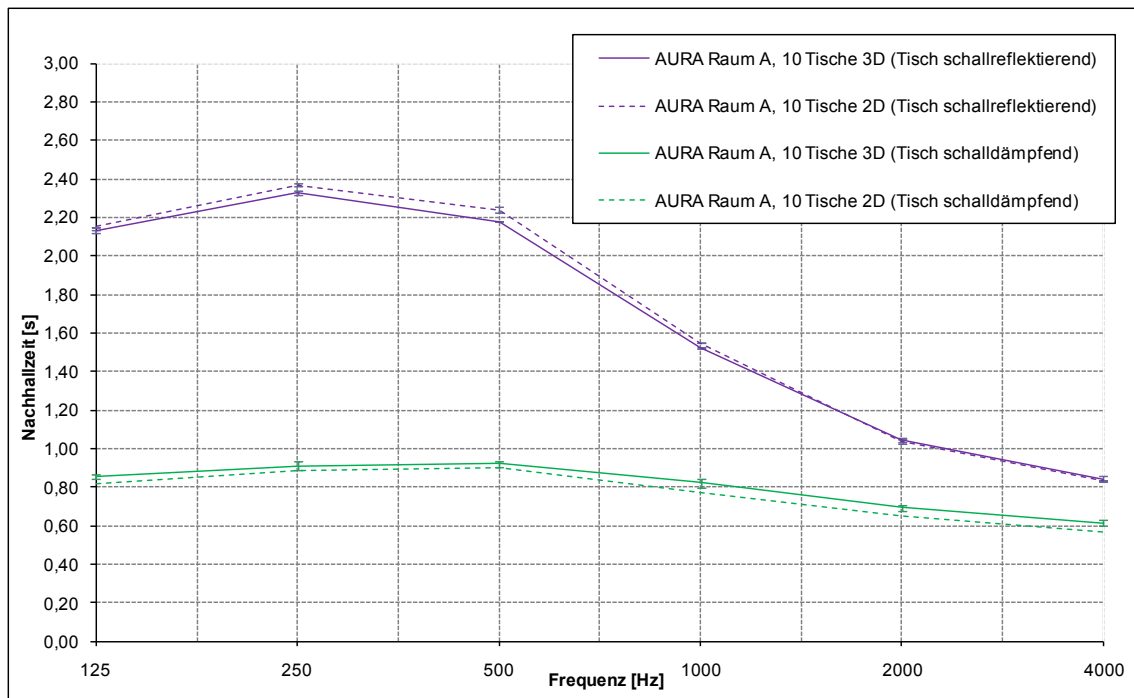


Abbildung 57-H: Berechnungen bei variiert Tischabsorption, Raum A

Tabelle 35-H: 2D-Absorptionsgrade Tisch (andere Bodenwerte)

Frequenz [Hz]	$\alpha_{\text{Tisch,3D}}$	α_{Boden} (reflektierend)	$\alpha_{\text{Tisch,2D}}$	α_{Boden} (dämpfend)	$\alpha_{\text{Tisch,2D}}$
100	0,24	0,01	0,46	0,40	0,73
125	0,22	0,01	0,42	0,40	0,69
160	0,18	0,01	0,35	0,40	0,62
200	0,14	0,01	0,27	0,40	0,54
250	0,11	0,01	0,21	0,40	0,49
315	0,10	0,01	0,20	0,40	0,47
400	0,09	0,01	0,18	0,40	0,45
500	0,09	0,01	0,18	0,40	0,45
630	0,08	0,01	0,16	0,40	0,43
800	0,07	0,01	0,14	0,40	0,41
1000	0,06	0,01	0,12	0,40	0,39
1250	0,07	0,01	0,14	0,40	0,41
1600	0,09	0,01	0,18	0,40	0,45
2000	0,10	0,01	0,20	0,40	0,47
2500	0,10	0,01	0,20	0,40	0,47
3150	0,11	0,01	0,21	0,40	0,49
4000	0,11	0,01	0,21	0,40	0,49
5000	0,11	0,01	0,21	0,40	0,49

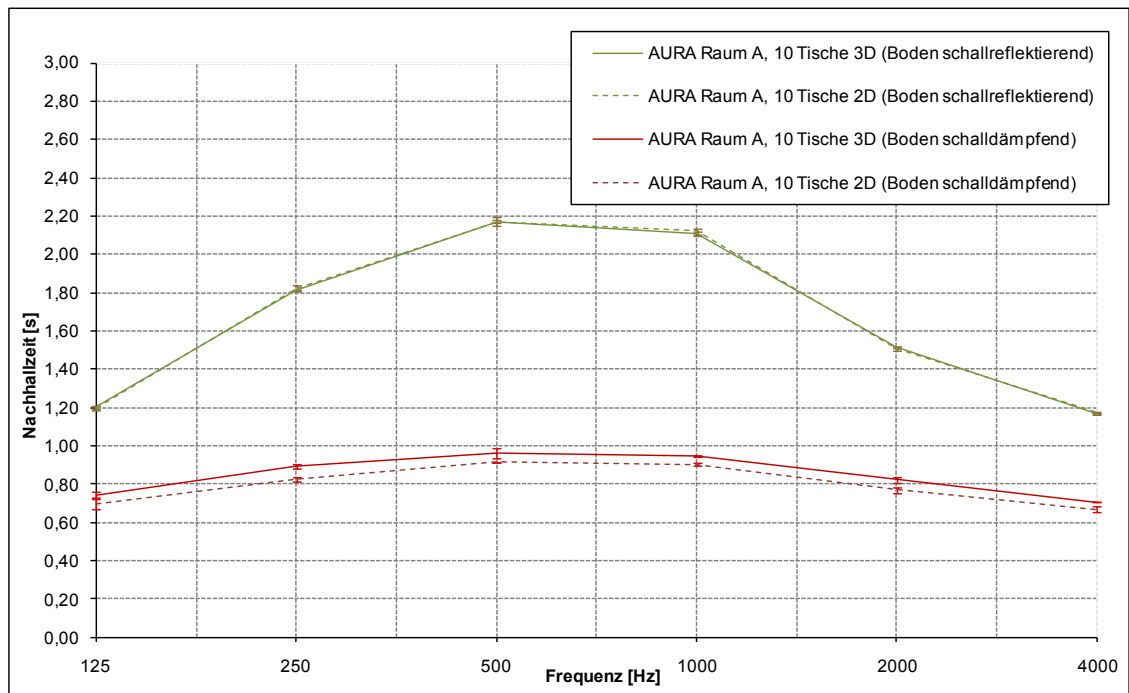


Abbildung 58-H: Berechnungen mit Tischen bei variiertter Bodenabsorption, Raum A

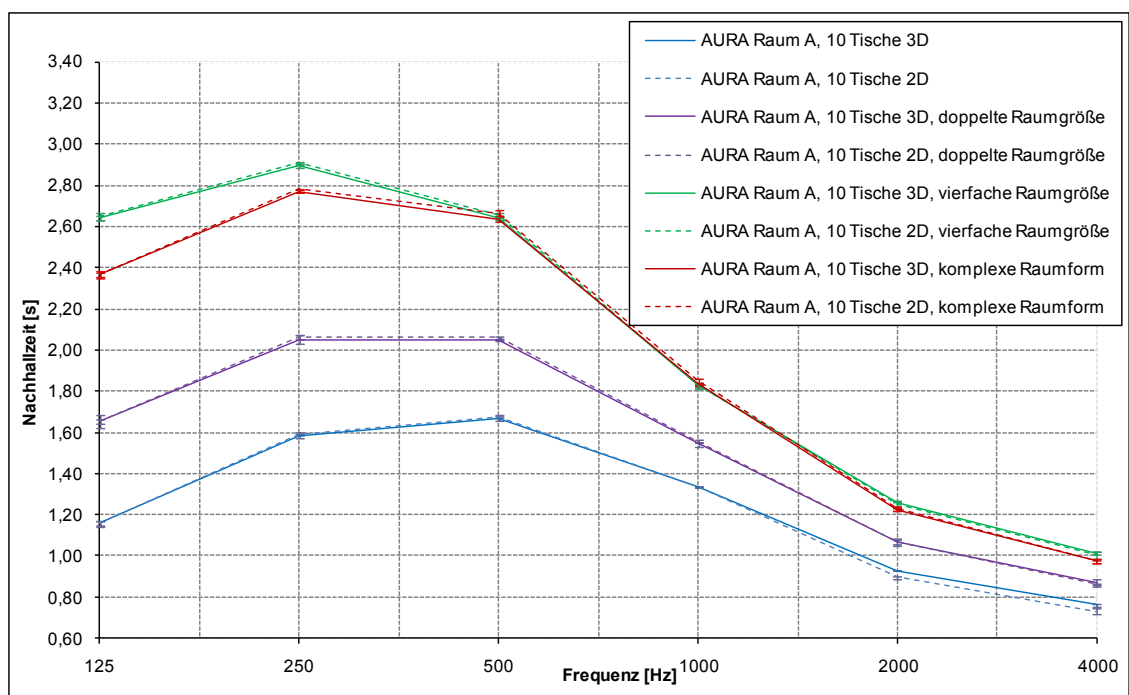


Abbildung 59-H: Berechnungen mit Tischen bei anderer Raumform/ -größe, Raum A

Anlage I: Stühle

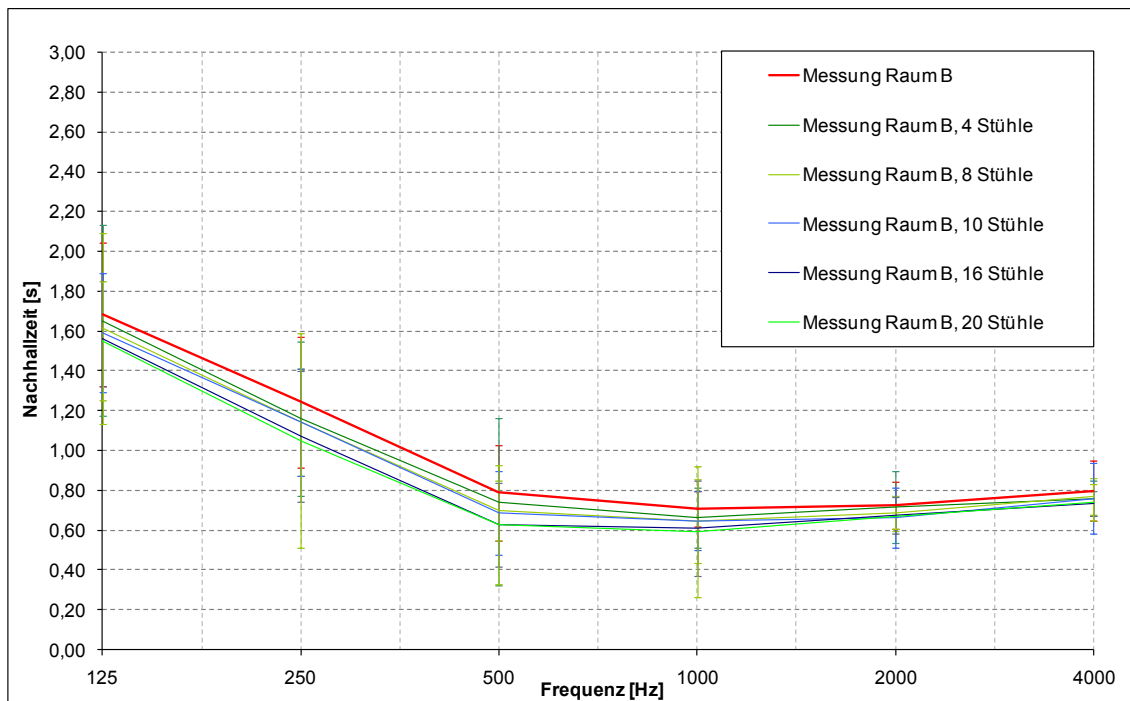


Abbildung 60-I: Messungen mit Stühlen, Raum B

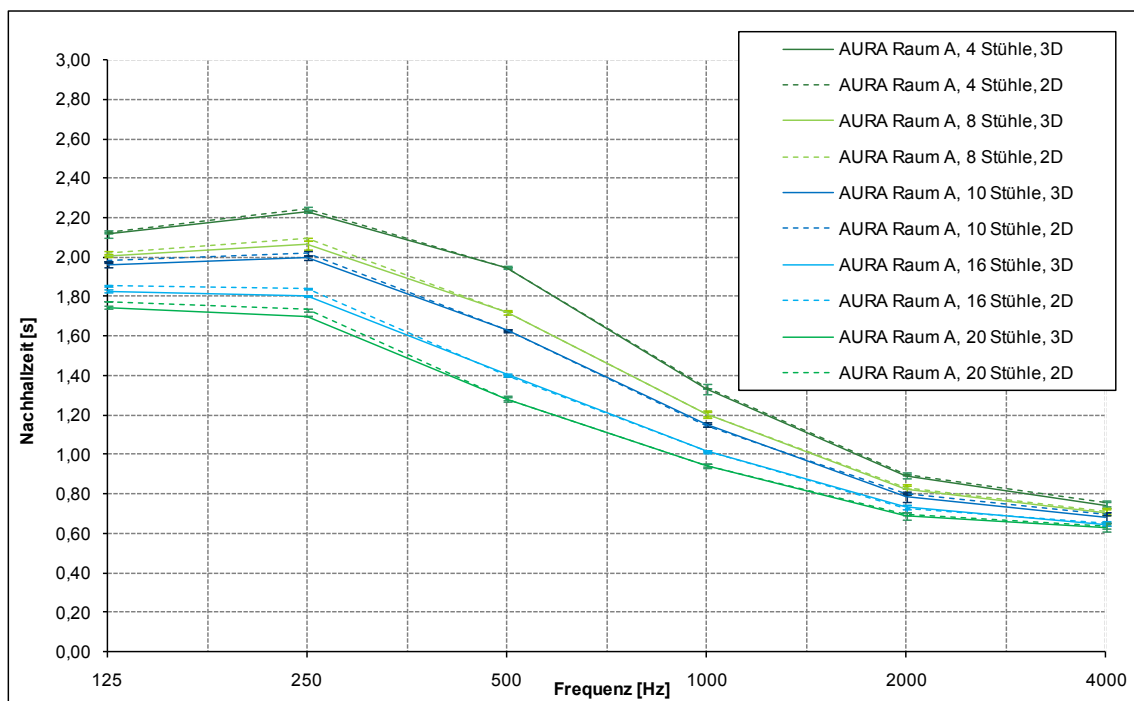


Abbildung 61-I: Berechnungen bei variabler Stuhlanzahl, Raum A

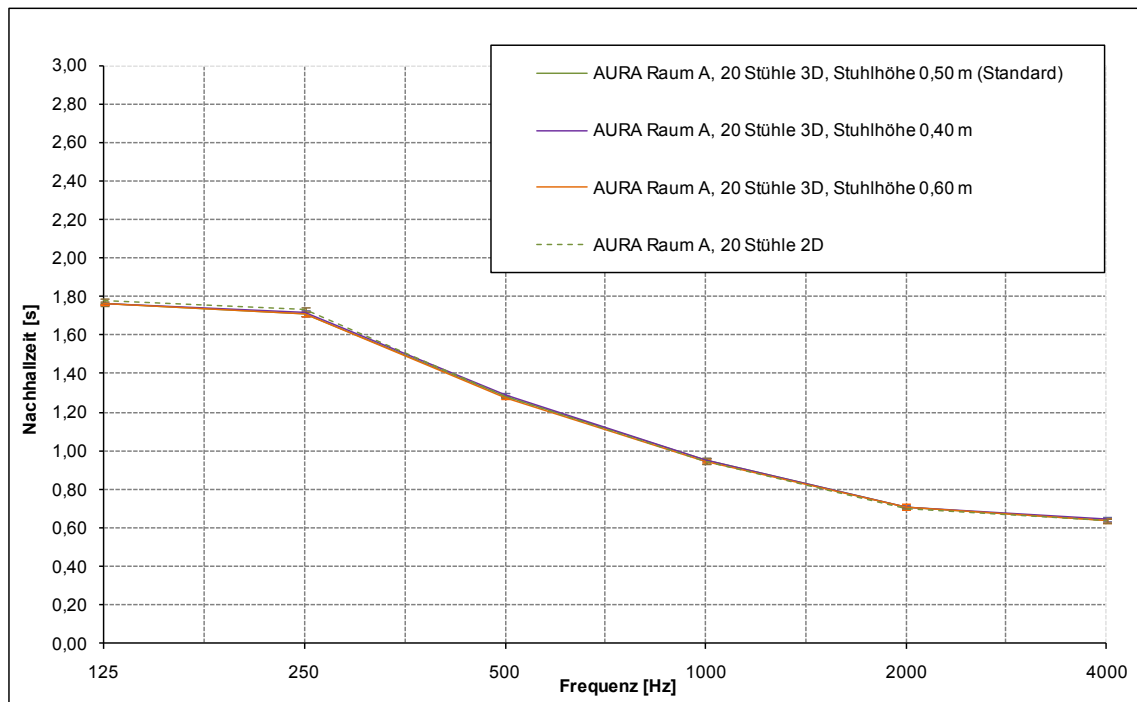


Abbildung 62-I: Berechnungen bei variabler Stuhlhöhe, Raum A

Anlage J: Anwendungsbeispiel für folgende Aufgabenstellung

Gegeben ist ein exemplarischer Raum, für den in der Planungsphase Maßnahmen an den raumumfassenden Bauteilen zu erarbeiten sind. Dabei sind die nach DIN 18041:2004 - anzustrebenden frequenzabhängigen Nachhallzeiten für Sprache ($T_{\max} \geq T_{\text{rech}} \geq T_{\min}$) einzuhalten.

Basierend auf der vorliegenden Diplomarbeit wird das nachstehende Ablaufschema für einen Raum exemplarisch abgearbeitet:

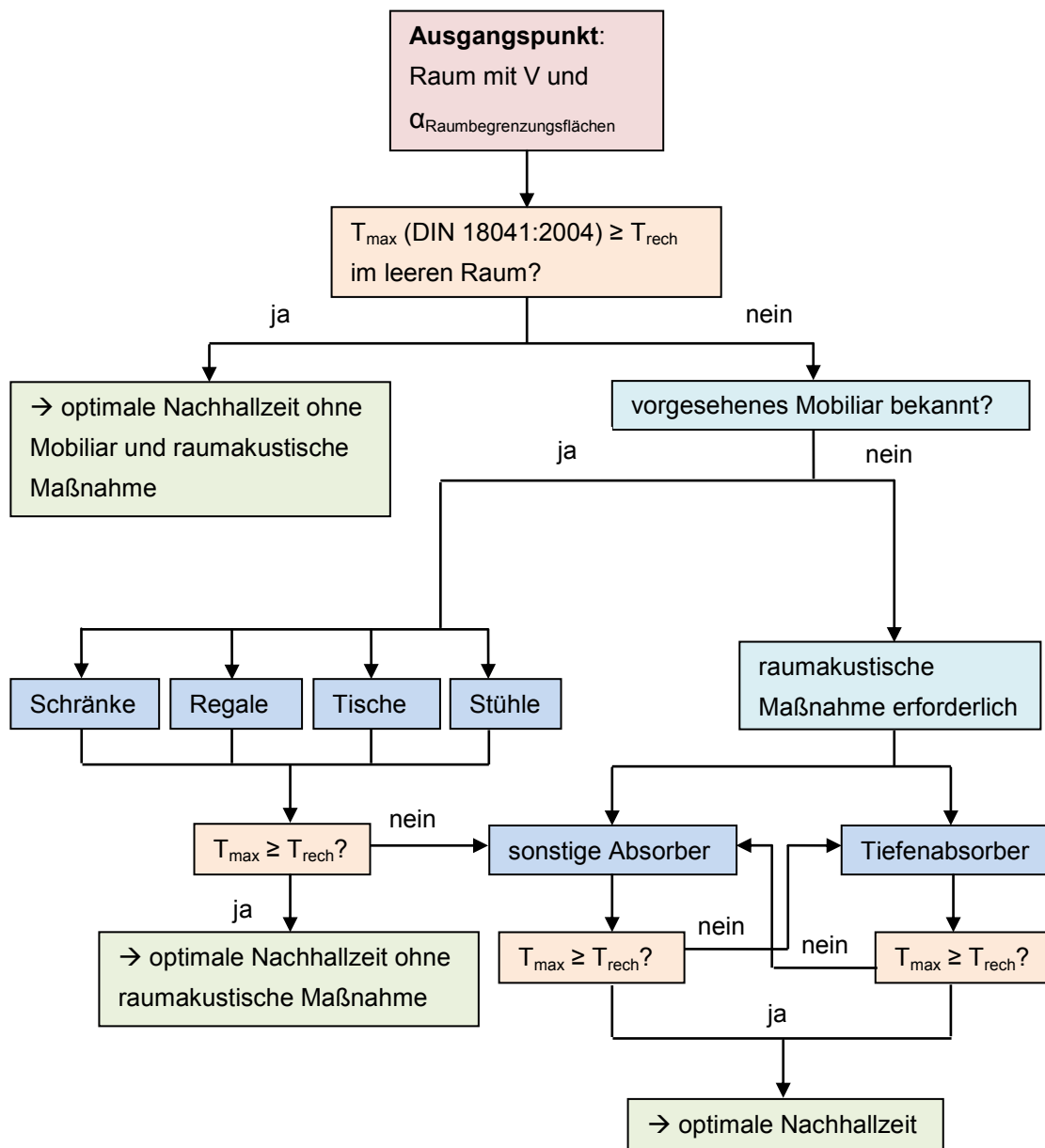


Abbildung 63-J: Ablaufschema bei Prognoseerstellung

Planungsgrundlagen

- $V = 67,7 \text{ m}^3$, Raummaße: $l/b/h = 4,8 \text{ m}/4,7 \text{ m}/3,0 \text{ m}$, entspricht **Raum A (Abschnitt 3.1.1)**
- Der betrachtete Frequenzbereich liegt zwischen 125 Hz und 4000 Hz.
- Die Materialien, Flächen und Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen sind im **Abschnitt 3.1.1.** ausgewiesen.

erforderliche Nachhallzeit

→ Raumnutzung für Sprache nach DIN 18041:2004 /15/, s. **Abbildung 65-J**

Ausgangssituation: Raum ohne Mobiliar: $T_{\max} < T_{\text{rech}}$

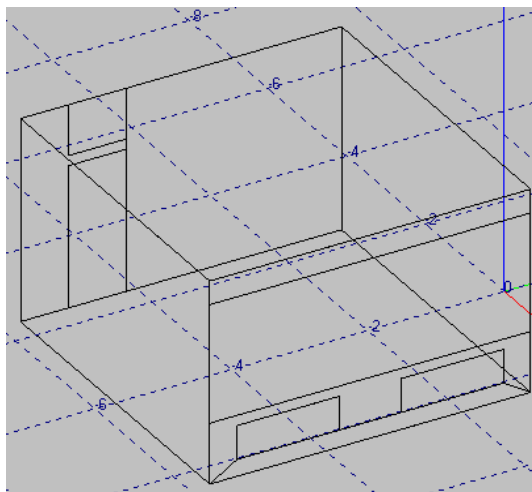


Abbildung 64-J: Modell ohne Mobiliar

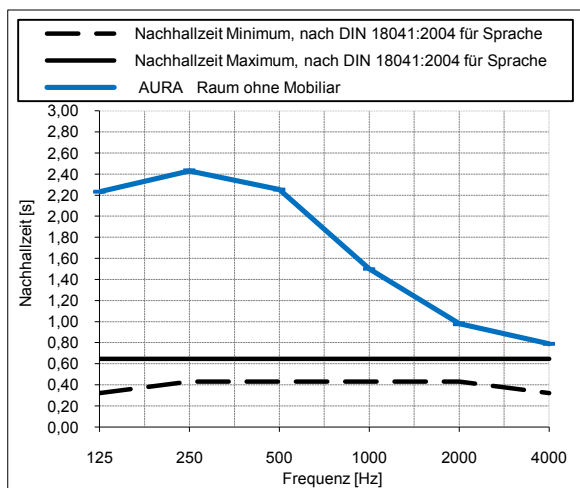


Abbildung 65-J: berechnete Nachhallzeit im Raum ohne Mobiliar

Maßnahme: Deckenabsorber ($22,6 \text{ m}^2$)

Tabelle 36-J: Absorptionsgrade Deckenabsorber im Raum ohne Mobiliar

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Deckenabsorber ($22,6 \text{ m}^2$)	0,70	0,71	0,78	0,71	0,50	0,30

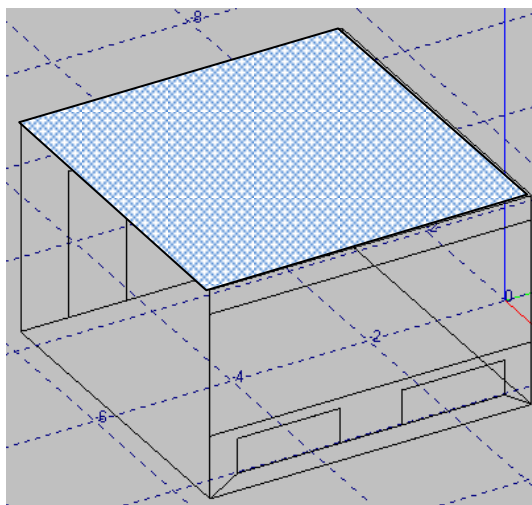


Abbildung 66-J: Modell ohne Mobiliar, mit Deckenabsorber

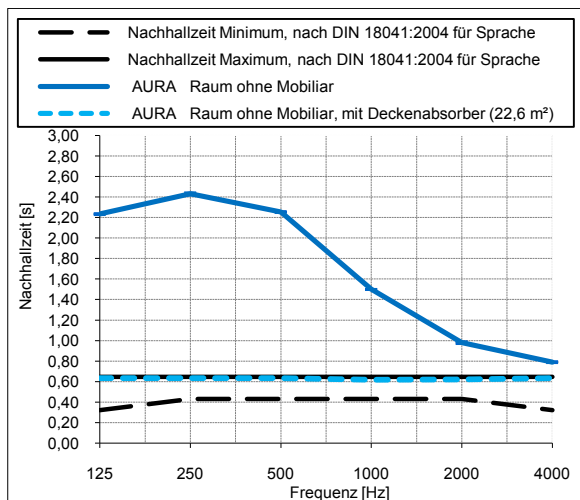


Abbildung 67-J: berechnete Nachhallzeit im Raum ohne Mobiliar, mit Deckenabsorber

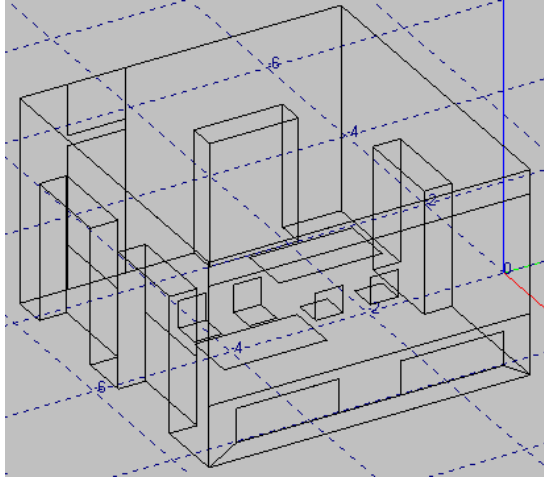
Situation mit Mobiliar:

2 Schränke (je $h/b/t = 1,80 \text{ m}/1,30 \text{ m}/0,40 \text{ m}$)

2 Kombinationen Schrank/Regal (je $h/b/t = 2,00 \text{ m}/1,30 \text{ m}/0,40 \text{ m}$, gleiche Anteile)

2 Tische (je $l/b = 1,50 \text{ m}/0,75 \text{ m}$)

4 unbesetzte Polsterstühle (je Lehne: $0,40 \text{ m} \times 0,40 \text{ m}$; je Sitzfläche: $0,40 \text{ m} \times 0,40 \text{ m}$)

3D-Mobiliar**Abbildung 68-J:** Modell mit 3D-Mobiliar

Schrank (ohne Rückseite)

$$S_{\text{Schrank},3D} = [(1,80 * 1,30) + (2 * 1,80 * 0,40) + (1,30 * 0,40)] \text{ m} = 4,30 \text{ m}^2$$

Kombination Schrank/Regal (ohne Rückseite)

$$S_{\text{Schrank},3D} = [(1,00 * 1,30) + (2 * 2,00 * 0,40) + (1,30 * 0,40)] \text{ m} = 3,42 \text{ m}^2$$

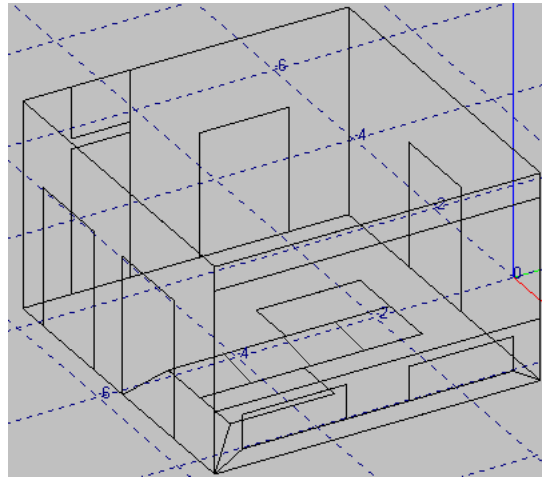
$$S_{\text{Regalfront}} = (1,00 * 1,30) \text{ m} = 1,30 \text{ m}^2$$

Tisch (beidseitig)

$$S_{\text{Tisch},3D} = (2 * 1,50 * 0,75) \text{ m} = 2,25 \text{ m}^2$$

Stuhl (allseitig)

$$S_{\text{Stuhl},3D} = (4 * 0,40 * 0,40) \text{ m} = 0,64 \text{ m}^2$$

2D-Mobiliar**Abbildung 69-J:** Modell mit 2D-Mobiliar

Schrank (entspricht Schrankfront)

$$S_{\text{Schrank},2D} = (1,80 * 1,30) \text{ m} = 2,34 \text{ m}^2$$

Kombination Schrank/Regal (entspricht Schrank- bzw. /Regalfront)

$$S_{\text{Schrank/Regal},2D} = (2,00 * 1,30) \text{ m} = 2,60 \text{ m}^2$$

Tisch (entspricht Tischoberseite)

$$S_{\text{Tisch},2D} = (1,50 * 0,75) \text{ m} = 1,13 \text{ m}^2$$

Stuhl (entspricht $0,80 \text{ m} \times 0,80 \text{ m}$)

$$S_{\text{Stuhl},2D} = (0,80 * 0,80) \text{ m} = 0,64 \text{ m}^2$$

Tabelle 37-J: Absorptionsgrade α_{3D} des 3D-Mobiliars (bekannt)

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Schrank, 3D*	0,55	0,23	0,14	0,13	0,24	0,37
Regalfront (halbvoll mit Ordnern)**	0,31	0,09	0,23	0,49	0,51	0,56
Tisch, 3D***	0,21	0,12	0,09	0,07	0,10	0,11
Stuhl (unbesetzt), 3D****	0,10	0,15	0,31	0,38	0,46	0,36

* Abschnitt 4.2.3, ** Abschnitt 4.3.4, *** Abschnitt 4.4.3, **** Abschnitt 4.5.3

2D-Schrank (**Abschnitt 4.2.4**)

$$\alpha_{\text{Schrank},2D} = \frac{\alpha_{\text{Schrank},3D} * S_{\text{Schrank},3D}}{S_{\text{Schrank},2D}}$$

2D-Schrank/Regal (**Abschnitt 4.3.5**)

$$\alpha_{\text{Schrank/Regal},2D} = \frac{(\alpha_{\text{Schrank},3D} * S_{\text{Schrank},3D}) + (\alpha_{\text{Regalfront}} * S_{\text{Regalfront}})}{S_{\text{Schrank/Regal},2D}}$$

2D-Tisch (**Abschnitt 4.4.4**)

$$\alpha_{\text{Tisch},2D} = (1 + 0,88) * \alpha_{\text{Tisch},3D} + 0,70 * \alpha_{\text{Boden}}$$

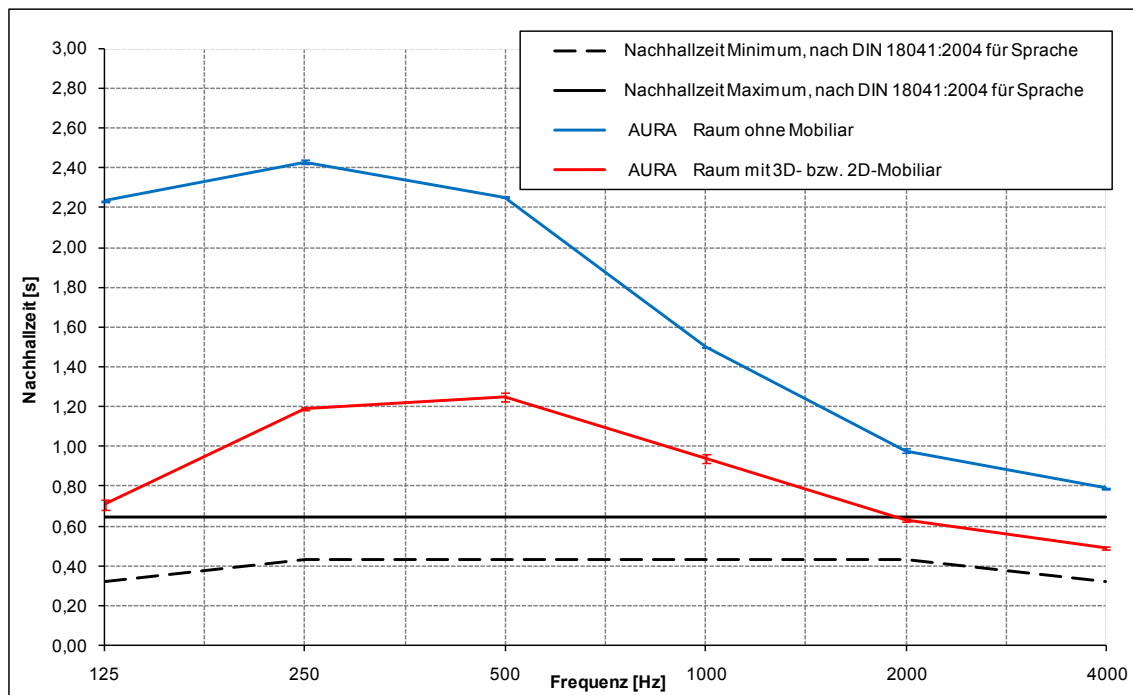
2D-Stuhl (**Abschnitt 4.5.4**)

$$\alpha_{\text{Stuhl},2D} = 0,970 * \alpha_{\text{Stuhl},3D} + 0,925 * \alpha_{\text{Boden}}$$

Tabelle 38-J: Absorptionsgrade α_{2D} des 2D-Mobiliars (berechnet)

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Schrank, 2D	1,01*	0,43	0,26	0,23	0,44	0,67
Schrank/Regal, 2D	0,88	0,35	0,30	0,41	0,57	0,76
Tisch, 2D	0,42	0,26	0,23	0,25	0,38	0,43
Stuhl (unbesetzt), 2D	0,12	0,19	0,38	0,53	0,71	0,65

* Eingabe 1,00 in EASE

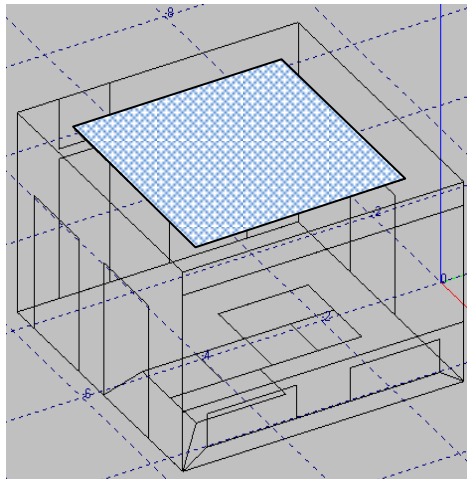
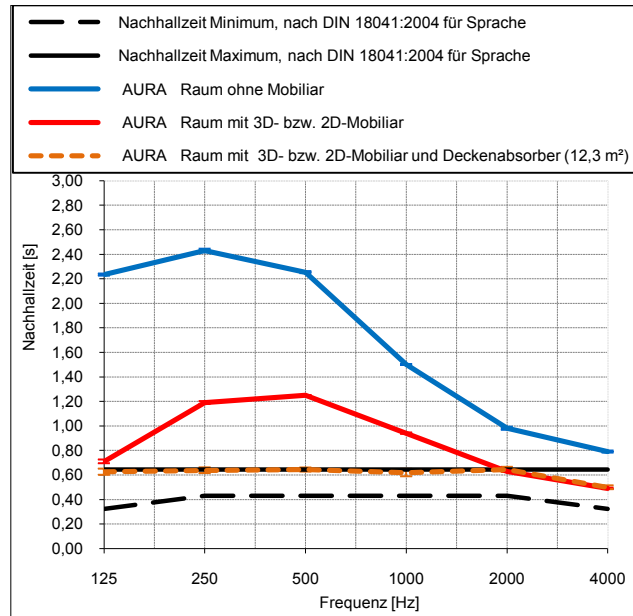
**Abbildung 70-J:** berechnete Nachhallzeit im Raum mit 3D- bzw. 2D-Mobiliar

→ Die berechneten Nachhallzeiten mit 3D- und 2D-Mobiliar sind identisch.

$$T_{\text{max}} \leq T_{\text{rech},3D \text{ bzw. } 2D}$$

Maßnahme: Deckenabsorber (12,3 m²)**Tabelle 39-J:** Absorptionsgrade Deckenabsorber im Raum mit Mobiliar

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Deckenabsorber (12,3 m ²)	0,18	0,71	0,78	0,71	0,01	0,01

**Abbildung 71-J:** Modell mit 2D-Mobiliar und Deckenabsorber**Abbildung 72-J:** Vergleich berechneter Nachhallzeiten im Raum mit Mobiliar

$$T_{\max} \geq T_{\text{rech, 3D bzw. 2D}}$$

Ergebnis:

Um den unmöblierten Raum raumakustisch zu optimieren, sind schwerpunktmäßig im tief- und mittelfrequenten Bereich hohe Absorptionsgrade über den gesamten Deckenbereich notwendig. Durch die raumakustische Wirkung des anschließend berücksichtigten Mobiliars sind keine Tiefenabsorber erforderlich, nur im mittelfrequenten Bereich ist eine Absorption in diesem Raum unerlässlich. Die nötige Absorberfläche verringert sich ca. um die Hälfte gegenüber der im Raum ohne Einrichtungsgegenstände (von 22,6 m² auf 12,3 m²), was die hohen Absorptionsgrade von 250 Hz bis 1000 Hz erklärt.

Literaturverzeichnis

Bücher

- /1/ Weinzierl, S.: Handbuch der Audiotechnik. Berlin: Springer-Verlag, 2008
- /2/ Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH): Informationsdienst Holz: Schalldämmende Holzbalken- und Brettstapeldecken. Holzbau Handbuch, Reihe 3. Teil 3. Folge 3. München, 1999
- /3/ Fasold, W.; Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998
- /4/ Fasold, W.; Sonntag, E.; Winkler H.: Bau- und Raumakustik. - 1. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1987
- /5/ Fasold, W.; Kraak, W.; Schirmer, W.: Taschenbuch Akustik: Teil 2. Berlin: VEB Verlag Technik, 1984
- /6/ Heckl, M.; Müller, A. H.: Taschenbuch der Technischen Akustik. - 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 1995
- /7/ Müller, G.; Möser, M.: Taschenbuch der Technischen Akustik. - 3. erweiterte und überarbeitete Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2004
- /8/ Schmidt, H.: Schalltechnisches Taschenbuch. - 4. Auflage. Düsseldorf: VDI Verlag, 1988
- /9/ Werner, U.-J.: Schallschutz und Raumakustik: Handbuch für Theorie und Praxis. - 1. Auflage. Berlin: Bauwerk Verlag, 2009

wissenschaftliche Schriften

- /10/ Abou-Elleal, E. R. E.: Raumakustik: Interaktion visueller und auditiver Wahrnehmungen. – 108 S. Aachen, Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule, Fakultät Architektur, Dissertation, 2003

- /11/ Köhler, T.: Anwendung nichtlinearer Regressionsverfahren zur Approximation von Raumimpulsantworten. – 123 S. Ilmenau, Technische Universität, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation, 2006
- /12/ Rothe, C.: Untersuchung diffuser kohärenter Schallfelder in Atrien. – 78 S. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Diplom, 2005
- /13/ Stephenson, U. M.: Beugungssimulation ohne Rechenzeitexplosion: Die Methode der quantisierten Pyramidenstrahlen: ein neues Berechnungsverfahren für Raumakustik und Lärmimmissionsprognose. – 192 S. Aachen, Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation, 2004

Normen

- /14/ DIN EN 12354-6: 2004. Bauakustik: Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. – Teil 6: Schallabsorption in Räumen
- /15/ DIN 18041: 2004. Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen
- /16/ DIN EN ISO 3382-2: 2008. Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen
- /17/ DIN EN 60268-16: 2003. Elektroakustische Geräte. – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex

Forschungsberichte, Firmenschriften

- /18/ Vorländer, M.: Computermodele zur Vorausberechnung der Akustik von Räumen. DAGA Duisburg, 1989
- /19/ ADA (Acoustic Design Ahnert): Tutorial für EASE 4.0

Vorlesungsmaterial

- /20/ Hübelt, J.: Vorlesungsmaterial: Technische Akustik II. Mittweida, Hochschule Mittweida, Studiengang Umweltakustik, 2009

Internetquellen

- /21/ DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder. URL:
<http://www.dega-akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlungen_101.pdf>,
verfügbar am 19.07.2010
- /22/ Eggenschwiler, K.: Welche quantitativen Planungswerkzeuge stehen heute der
Raumakustik zur Verfügung?. URL:
<<http://www.arch.ethz.ch/eggenschwiler/vortrag1.pdf>>,
verfügbar am 22.04.2010
- /23/ Institut für Elektronische Musik und Akustik: Raumakustische Grundlagen. URL:
<<http://iem.kug.ac.at/~sontacci/beschallung/RaumakustischeGrundlagen.pdf>>,
verfügbar am 15.09.2010
- /24/ Lehrstuhl und Institut für Technische Akustik (ITA): Caesar. URL:
<<http://www.akustik.rwth-aachen.de/Forschung/Forschungsgebiete/raum/caesar>>,
verfügbar am 15.09.2010
- /25/ Universität Duisburg, Essen: Bauphysik-Interaktiv: Plattenschwinger. URL:
<http://www.uni-due.de/ibpm/Bauphysik-Interaktiv/nh_sh_plattenschw1.htm>,
verfügbar am 26.10.2010
- /26/ Züger, U.: Akustische Grundlagen Zusammenfassung. URL:
<http://www.zracoustics.ch/Dokumente/G_001_Akustik_Grundlagen.pdf>,
verfügbar am 15.09.2010

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Leipzig, 03.02.2011

Nicole Radoi